CAMPA ET ROLLET

TECHNOLOGIE

professionnelle générale pour les

MÉCANICIENS

TOME III

Procédés d'usinage

FOUCHER

FOUCHER

Collection " LA TECHNIQUE DU MÉTIER "

Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens.	
Tome 1 — Préparation au diplôme de technicien et au baccalauréat technique. Mode d'obtention des pièces mécaniques, métrologie. — Obtention par coupe de métal	A. CAMPA
Tome 2 — Préparation au diplôme de technicien. Essai des matériaux. — Etude des propriétés des différents métaux. — Traitements thermiques. — Métrologie. — Usinage. — Corrosion	—
Technologie professionnelle générale pour l'automobile (3 volumes)	DESBOIS, TORRI, TOUACHE, TOURANCHEAU, ARMAO et VIEUX
Technique de la réparation (2 volumes)	DESBOIS, MARTIN et MARIÉ
Technologie professionnelle pratique	
Pour **le tourneur** (4 volumes)	L. GOUPIL
Pour **le chaudronnier** (3 volumes)	C. LOBJOIS
Pour **le fraiseur**	A. ARNAUD et A. ROLLET
Technologie de contruction mécanique (4 volumes)	LENORMAND et MIGNÉE

Collection " LA TECHNIQUE GRAPHIQUE "

Schémas d'électricité	P. HEINY
Mémento de dessin industriel Conventions de représentation. Cotation. Documentation dimensionnelle. Problèmes graphiques.	LENORMAND et TINEL —

Collection " LA TECHNIQUE DU BATIMENT "

Technologie professionnelle de chantier : **Maçonnerie**	A. MEUNIER
Technologie professionnelle de chantier : **Béton armé**	—
Technologie professionnelle de construction : **Maçonnerie**	A. MEUNIER et LYSENSOONE
Les matériaux de construction	A. MEUNIER

ÉLECTRICITÉ

Electricité (2 volumes)	LEFRAND, AUCLERC, POINSARD
Technologie d'électricité (7 volumes)	P. HEINY et collaborateurs

Le livre au service du Métier

A. CAMPA ET J. ROLLET

Ingénieur A. et M. et E.S.E.
Inspecteur général
de l'Enseignement Technique.

Ingénieur A. et M.
Ingénieur Sous-Directeur
d'E.N.I.A.M.

TECHNOLOGIE
professionnelle générale pour les
MÉCANICIENS

TOME III

Procédés d'usinage

Classe de 1re
Préparation au B.E.I.

Classe de T.I.
Préparation au diplôme d'études techniques

LES ÉDITIONS FOUCHER
128, rue de Rivoli, Paris

PRÉFACE

L'ouvrage de technologie professionnelle générale pour les mécaniciens que nous venons de rédiger est conforme aux programmes des Lycées Techniques pour les classes de première. Il comprend deux parties : l'une relative aux procédés d'usinage et l'autre à l'étude fonctionnelle des machines-outils, aux principes généraux d'établissement des porte-pièces et à la métrologie des surfaces.

Le sujet traité est vaste ; mais en l'examinant attentivement on se rend compte qu'il contient les connaissances indispensables à tout technicien qualifié des ateliers ou des bureaux d'études.

La technologie professionnelle générale de l'année terminale des Lycées techniques d'État et des Lycées techniques se propose de regrouper les connaissances acquises au cours des années précédentes, de les classer, de les comparer et de les compléter ; ainsi les élèves de nos écoles sont préparés à résoudre les problèmes techniques généraux qui leur seront proposés tout au long de leur carrière industrielle.

La technologie est une discipline de formation générale parce qu'elle vise, à travers l'étude des méthodes de transformation des matériaux, à la formation intellectuelle des élèves.

Par les expériences faites en classe avec un matériel didactique approprié ou à l'atelier sur les machines de production, la technologie permet l'observation, l'analyse ou la synthèse d'un phénomène technique ; par un raisonnement rigoureux, elle conduit la pensée à l'établissement des grandes règles de travail. Elle habitue l'esprit à prévoir les conséquences des opérations d'atelier, à concevoir des organes de machines ou des outillages rationnels, à imaginer des méthodes de fabrication valables parce que fondées sur des principes sûrs.

Nous avons rédigé ce livre sans le découper en leçons car nous tenons à respecter la personnalité du professeur et non à l'astreindre à suivre un plan de travail détaillé dont il lui serait difficile de s'écarter, sans créer la confusion dans l'esprit des élèves.

Une leçon est le reflet pédagogique du professeur ; elle ne peut être conçue et organisée que par lui et pour un auditoire déterminé.

Le livre fournit aux élèves : les explications qu'un court résumé pris en classe ne peut contenir, les croquis trop complexes qui ne peuvent être relevés sans perte de temps excessive, les tableaux de valeurs et les graphiques indispensables au professionnel.

Pour ne pas exagérer le contenu de cet ouvrage nous n'avons pas décrit le matériel expérimental à utiliser pour illustrer toutes les leçons de technologie. Nous nous sommes contentés d'indiquer, dans les chapitres les plus caractéristiques, comment tirer parti d'un matériel convenablement étudié.

Nous avons étudié pour la résolution des calculs les unités du système S.I. laissant le soin au lecteur de rechercher la correspondance en unités du système MKpS dont l'unité de force 1 kilogramme-force égale 9,81 Newtons : 1 kgf = 9,8 N ≃ 10 N.

Les contraintes auraient dû être exprimées comme les pressions en Pascal. Nous avons préféré les écrire en Newton par millimètre carré afin de rendre plus facile dans l'esprit du lecteur la conversion en kgf : mm².

La désignation méga-Pascal à la place de Newton par millimètre carré aurait rendu, dans une période de transition, la lecture de l'ouvrage un peu trop difficile.

Nous espérons que cet ouvrage trouvera un accueil sympathique auprès des collègues chargés de l'Enseignement de la Technologie et qu'il rendra service aux élèves qui l'utiliseront.

LES AUTEURS.

Toute représentation, traduction, adaptation ou reproduction, même partielle, par tous procédés, en tous pays, faite sans autorisation préalable, est illicite et exposerait le contrevenant à des poursuites judiciaires. (Réf. Loi du 11 mars 1957.)
© Les Editions FOUCHER, Paris, 1971.

Étude des procédés de travail

C'est au préparateur du travail, au gammiste, qu'incombe le choix des machines les mieux appropriées à l'exécution, d'une fabrication déterminée.

Il lui faut bien connaître, pour chaque machine dont il envisage l'emploi :

— le mode d'action de l'outil,

— les valeurs des déformations de l'ensemble machine-pièce-outil, ou la précision possible,

— les limites d'utilisation,

— les équipements normaux,

— les équipements spéciaux possibles.

Si, en cours de fabrication, des difficultés imprévues se révèlent dans la marche des machines choisies, il doit être capable de pallier ces difficultés :

— en modifiant les conditions de coupe et, si besoin est, la géométrie de l'outil,

— en modifiant ou en créant l'outillage spécial nécessaire à la mise en place des outils ou des pièces.

Pour chacune des opérations à réaliser, le préparateur a à choisir, parmi les machines de la classe correspondante, celle qui conviendra le mieux pour atteindre :

— la précision imposée,

— le prix de revient minimum.

Le technicien doit donc connaître les différents procédés d'usinage des surfaces ; c'est l'objet des leçons qui vont suivre.

Au cours de cette étude, rejetant le particulier ou l'arbitraire, nous tenterons de dégager le plus possible les principes généraux d'usinage par enlèvement de métal à l'aide d'outils coupants. Nous nous efforcerons de justifier le choix des machines-outils d'après leurs possibilités et nous pourrons alors énoncer des règles particulières pour l'emploi de certaines d'entre elles.

Les grands principes de l'usinage des surfaces

Cette étude portera sur :

1° le choix du type d'outil et du type de machine :
— outil d'enveloppe ou outil de forme,
— machine banale ou machine spéciale.

2° l'organisation des différentes phases de l'usinage :
— ébauche et finition.

3° la recherche de la précision dans l'exécution d'une surface :
— Mise à la cote et réalisation d'un état macrogéométrique satisfaisant ;
— Approche de l'état microgéométrique idéal.

4° la position relative des différentes surfaces usinées.

5° la rapidité d'exécution.

LE CHOIX DU TYPE D'OUTIL ET DU TYPE DE MACHINE

Les outils

L'étude du mode d'action des outils a montré que les surfaces usinées sont obtenues en utilisant :

1° *des outils d'enveloppe* (*fig.* 1) : la surface usinée est l'enveloppe des positions successives occupées par la partie active de l'outil. L'outil est alors animé d'un mouvement d'avance tel que l'extrémité de l'outil décrive la génératrice de la surface à obtenir ;

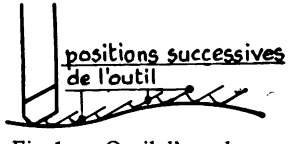


Fig. 1. — Outil d'enveloppe.

2° *des outils de forme* (*fig.* 2) : l'arête tranchante de l'outil reproduit la génératrice de la surface à obtenir. L'outil doit être animé, par rapport à la pièce, d'un mouvement rectiligne de pénétration dans le métal (*ex.* : tournage d'une pièce à génératrices courbes), ou d'un mouvement d'avance suivant une génétrice de la surface à produire (taille d'un alésoir hélicoïdal avec une fraise de forme).

● Les **outils d'enveloppe** sont simples, faciles à exécuter et à affûter ; ils ont fait l'objet de normes (N. F. 66 311 à 336). Ils sont exécutés en série dans les ateliers d'outillage des usines de construction mécanique qui les utilisent. Leur prix de revient n'est donc pas élevé.

Exemples : outils de tour, de rabotage, outils pour fraisage de face, etc.

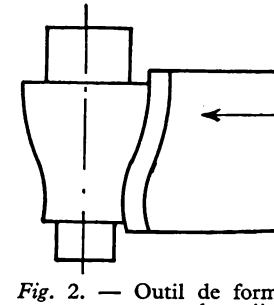


Fig. 2. — Outil de forme pour tournage de pièce de révolution à directrice courbe.

● Les **outils de forme** sont de deux types :

a) **Outils de forme normalisés** : forets, alésoirs, tarauds, peignes de filetage, fraises pour taille des engrenages ou des alésoirs, broches pour moyeux cannelés, etc.

Ce sont des outils à profil constant, faciles à affûter. Ils sont exécutés dans des ateliers spécialisés.

b) **Outils de forme spéciaux,** conçus en vue de l'exécution d'une pièce particulière.

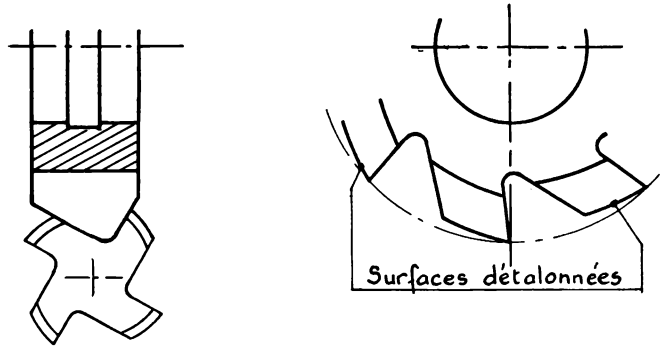


Fig. 3. — Fraise de forme pour le taillage des tarauds.

Ces outils peuvent être :

— *à profil constant.* Toutes les sections droites de la face en dépouille ont la forme de la génératrice de la pièce à usiner. L'affûtage, sur la face d'attaque, est rapide et facile. *Exemples :* fraises de forme (*fig.* 3), outils de tour ou de rabotage, constitués par des barreaux profilés montés sur des porte-outils (*fig.* 4), broches, etc. Ils sont utilisés pour des fabrications de moyenne et grande série.

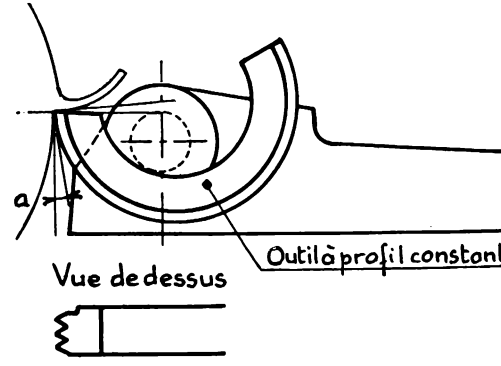


Fig. 4. — Outil à profil constant pour filetage (outil courbe) à affûtage sur la face d'attaque.

— *semblables à des outils d'enveloppe* (*fig.* 5), dont l'arête tranchante seule est au profil de la génératrice de pièce à usiner. Ces outils, plus faciles à réaliser que les précédents, sont utilisés pour les travaux unitaires ou de petite série, dans le cas où aucun réaffûtage n'est prévu. Ils

peuvent être utilisés pour des travaux de série, quand l'atelier possède une machine à pantographe permettant de les affûter avec précision.

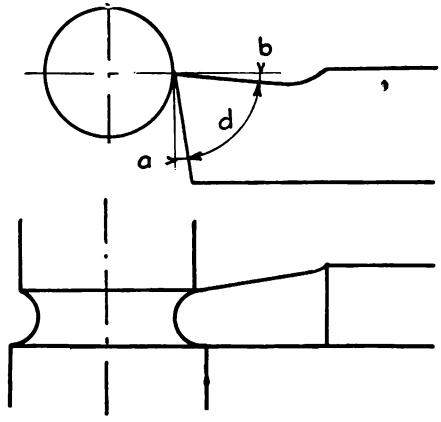


Fig. 5. — Outil à profil constant dont le réaffûtage nécessite la réfection totale du profil.

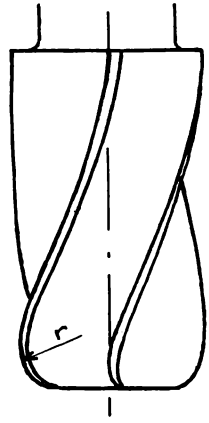


Fig. 6. — Fraise à angle arrondi pour usinage des matrices de forge.

Sur ces machines la meule trace l'homothétique d'une courbe dessinée à grande échelle. Cette courbe est suivie à l'aide d'un dispositif optique, électronique ou à cellule photo-électrique. *Exemples* d'outils : lames d'alésage, outils de tour pour congés ou génératrices courbes, outils de fraisage obtenus à partir de fraises deux tailles, dont on a profilé les arêtes tranchantes (*fig.* 6) (fraisage des matrices). Les outils de forme spéciaux sont toujours d'un prix de revient élevé.

Les machines

Les outils d'enveloppe sont montés sur des machines banales : tours à charioter et fileter, étaux-limeurs, raboteuses, mortaiseuses, fraiseuses...

Ils équipent aussi des machines conçues pour des travaux de série : machines à outils multiples et à cycle automatique (tours semi-automatiques et automatiques), machines à reproduire (tours à copier), certaines machines à tailler.

En général, les machines équipées avec des outils d'enveloppe sont des machines chères, à taux d'utilisation horaire élevé. Mais, étant donné le prix modique de l'outil et sa résistance aux efforts de coupe (même aux grandes vitesses) le prix de revient de l'usinage dans ce cas, soutient la comparaison avec ceux des autres procédés, aussi bien pour des petites et moyennes séries que pour les grandes.

Les outils de forme normalisés peuvent être utilisés sur les machines banales : tours, raboteuses (outils-molettes), fraiseuses, aléseuses... et, également, sur des machines spécialement conçues pour leur utilisation. Ces machines sont généralement simples : perceuses, taraudeuses, machines à brocher, et d'un taux horaire peu élevé, mais elles sont quelquefois chères : machines à tailler complexes.

Ces outils conviennent pour la fabrication d'un nombre quelconque de pièces.

Les **outils de forme spéciaux** sont surtout conçus pour des travaux de grande série. On les monte alors sur des machines très simples, taux horaire peu élevé : tours de reprise à un seul chariot, fraiseuses d'opération. Ces machines ne comportent pas de boîte de vitesses et le mouvement de pénétration de l'outil est souvent manuel.

Aussi, bien que le prix de l'outil soit assez élevé, le faible taux horaire de la machine rend très acceptable le prix de revient de l'usinage.

Choix de l'outil et de la machine

Lorsque les différents procédés possibles d'usinage ont été recensés, c'est, en dernière analyse, l'aspect économique de chaque opération qui oriente le choix de l'outil et de la machine à adopter.

Ce choix est évidemment influencé par la nature et la capacité des machines existantes ainsi d'ailleurs que par leur tableau d'utilisation.

ORGANISATION DES DIFFÉRENTES PHASES DE L'USINAGE

Règle.

Dans les travaux de série, les opérations d'ébauche et de finition doivent être effectuées à des postes de travail différents. Pour les travaux d'outillage, on peut exécuter complètement les pièces sur la même machine, mais il convient de séparer les opérations d'ébauche et celles de finition.

Cette règle se justifie ainsi :

a) Les machines d'ébauche, qui enlèvent de gros copeaux, doivent être puissantes. Les conditions de coupe économique nécessitent de fortes avances et des vitesses de coupe réduites : leur gamme de vitesses pourra être peu étendue. Les machines de finition doivent offrir de grandes vitesses pour de faibles avances et de faibles sections de copeaux. Machines d'ébauche et machines de finition auront donc des caractéristiques différentes.

b) Les efforts de coupe étant toujours élevés pour les travaux d'ébauche, les machines utilisées perdent plus vite leur précision, mais celle des cotes d'ébauche est faible et on peut utiliser des machines même fatiguées.

c) L'ouvrier qui conduit une machine d'ébauche peut être moins qualifié que l'ouvrier chargé des finitions.

d) L'ébauche complète de la pièce permet de déceler les défauts de matière. Une ébauche incomplète, suivie d'une finition partielle, coûte cher si, en poursuivant l'ébauche, un défaut apparaît qui rend la pièce inutilisable.

e) L'ébauche « libère » les tensions internes du métal ; souvent même la pièce « évolue » pendant et après l'ébauche : la finition, intervenant sur la pièce stabilisée assure un travail de meilleure qualité.

f) Certains travaux d'ébauche fatiguent beaucoup le métal (écrouissage important en surface) ; on effectue alors un recuit après l'ébauche et parfois un sablage pour enlever la couche d'oxyde avant finition.

g) Pour les pièces coulées ou forgées, un recuit de stabilisation est indispensable après l'ébauche, qui a libéré les tensions internes ; ou bien on laissera « vieillir » la pièce sur parc le temps nécessaire à l'accomplissement d'une stabilisation naturelle.

h) On emploie de plus en plus des aciers traités dont on « exalte » les qualités par traitement thermique : dureté, contrainte de limite élastique, résistance à la rupture, s'élèvent et rendent la coupe difficile. Pour que l'usinage soit économique, on procède à l'ébauche alors que le métal est à l'état commercial. On peut ainsi, sans difficulté, enlever rapidement le maximum de copeaux.
Le traitement thermique (trempe et revenu), destiné à améliorer les propriétés mécaniques du métal, est inséré entre les opérations d'ébauche et de finition. Ce traitement modifie les caractéristiques du métal, et l'on calcule pour la finition, des nouvelles conditions de coupe. Souvent, l'outil en carbure ou la meule sont seuls utilisables. [$(Rr)_e > 1200$ à 1300 N/mm².] (1)

RECHERCHE DE LA PRÉCISION DANS L'EXÉCUTION D'UNE SURFACE

Mise à la cote et réalisation d'un état macrogéométrique satisfaisant

La mise à la cote et l'élimination des défauts macrogéométriques sont rendues difficiles par :

1° la flexion de la pièce, de l'outil ou de leurs supports,

2° l'usure de l'outil au cours des opérations de finition,

3° les imperfections dans le guidage des chariots et des broches de machines.

● Étude des flexions pièce, outil, supports.

Ces flexions sont provoquées par :

— les efforts de coupe,

— les tensions internes libérées au cours de l'usinage par l'enlèvement du métal,

— les efforts dus à un bridage maladroit des pièces,

— les contraintes dues à l'échauffement des pièces pendant l'usinage, qui s'établissent si la libre dilatation n'est pas assurée.

(1) Dans le système MKpS : $(Rr)_e > 120$ à 130 kgf/mm² (Newton/mm²) ; rappelons que un Newton/mm² égale un méga-Pascal.

On démontre (voir *fig.* 7) en résistance des matériaux, que les déformations de flexion sont importantes si :

a) les forces qui produisent la flexion ont une grande intensité,

b) la distance du point d'application des forces aux appuis est grande,

c) le moment d'inertie de la section des pièces fléchies est petit (pièces de petites dimensions),

Elles apparaissent en outre si les supports d'outil et de pièce ne sont pas rigides. Ce manque de rigidité peut provenir des dimensions trop faibles des éléments constituant ces supports, des surfaces d'assemblage trop petites, des jeux trop importants entre les surfaces de guidage, ou du mauvais serrage des boulons d'assemblage.

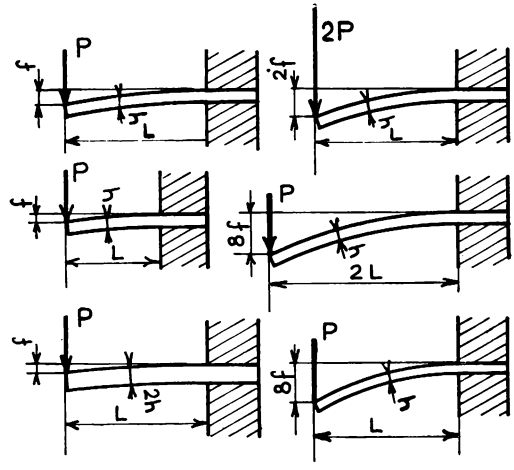


Fig. 7. — Les déformations de flexion sont fonction des efforts supportés par les pièces et leurs dimensions : distances entre efforts et appuis, moment d'inertie de leur section.

Conclusions

De l'étude qui précède, il résulte que, pour diminuer les flexions des outils, pièces et supports, il faut :

a) **Diminuer les efforts appliqués**

Efforts de coupe :

Réduire la section de copeau pour la passe de finition, choisir une forme d'outil et l'affûter de façon que les efforts de coupe soient minimum.

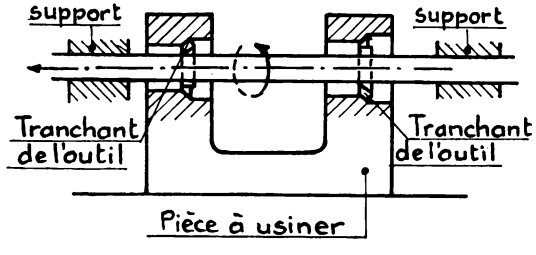


Fig. 8. — Disposition des outils d'alésage pour diminuer les déformations.

Quand on utilise des outils multiples, il faut les disposer de telle sorte que les composantes des efforts de coupe qui provoquent la flexion se fassent équilibre (affûtage parfaitement symétrique des arêtes tranchantes des forets, des fraises, montage en opposition des outils sur les barres d'alésage (*fig.* 8), etc.).

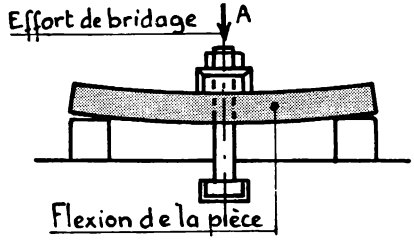


Fig. 9. — Déformation d'une pièce sous l'action des efforts de bridage.

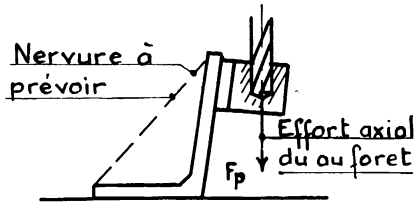


Fig. 10. — Déformation d'une pièce sous l'action d'un effort de coupe.

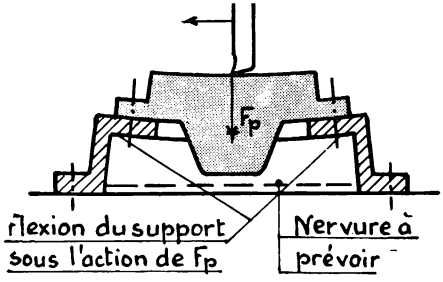


Fig. 11. — Déformation d'une pièce sous l'action des efforts de coupe.

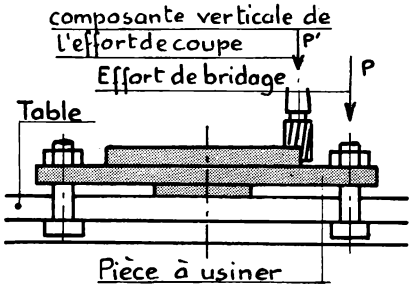


Fig. 12. — Déformation d'une pièce sous l'action des efforts de bridage et de coupe.

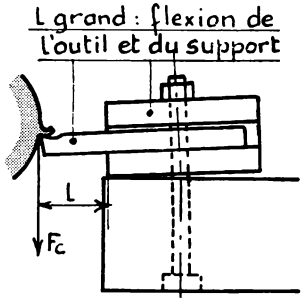


Fig. 13. — Les déformations peuvent résulter d'un support d'outil trop flexible.

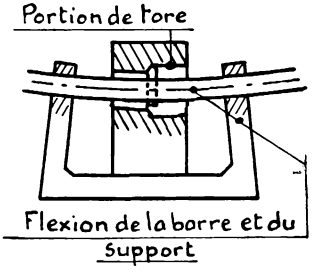


Fig. 14. — Les déformations des supports d'outil et de pièce trop flexibles conduisent à des défauts d'usinage.

Tensions internes :

— laisser s'écouler un certain temps entre l'ébauche et la finition (vieillissement) pour que la pièce retrouve son équilibre moléculaire,

— rechercher une gamme d'usinage produisant la compensation des déformations (application au rabotage des pièces longues ou minces),

— prévoir, si nécessaire, un recuit entre les opérations d'ébauche et de finition.

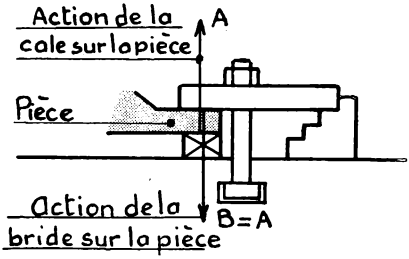


Fig. 15. — Bridage bien compris : un appui doit toujours équilibrer directement l'effort de bridage.

Efforts de bridage :

Les forces appliquées à la pièce par le dispositif de fixation doivent équilibrer les efforts de coupe et s'opposer à tout déplacement de la pièce au cours du travail, mais sans provoquer de déformations ni de la pièce, ni de son support (*fig.* 9, 10, 11, 12, 13, 14). A cet effet on se rappellera qu'un appui doit toujours être placé sous chaque bride (*fig.* 15).

Efforts dus à l'échauffement des pièces :

— réduire l'échauffement en limitant les efforts de coupe donc la section du copeau,

— évacuer les calories au fur et à mesure de leur production (arrosage abondant),

— prévoir, s'il y a lieu, la libre dilatation des pièces (*fig.* 16 *a* et 16 *b*).

— adopter, si possible, le montage en l'air plutôt que celui entre pointes sur le tour.

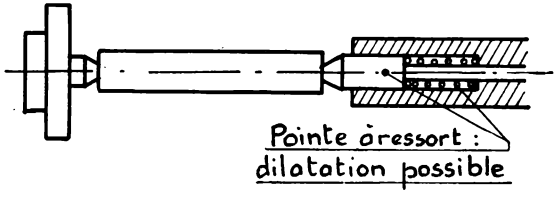


Fig. 16 *a.* — Le montage des pièces doit laisser la libre dilatation des pièces. Ex. : la contre-pointe de tour élastique.

b) **Diminuer la distance du point d'application des forces aux appuis :**

— réduire le plus possible le porte-à-faux des outils (*fig.* 17).

— prévoir des supports intermédiaires pour les pièces longues et flexibles le plus près possible de la zone d'action de l'outil (*fig.* 18).

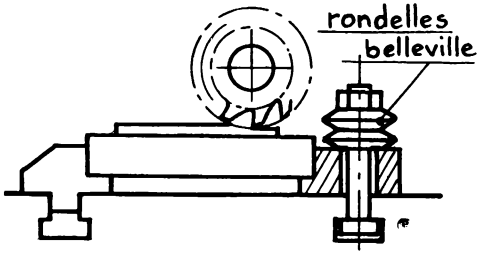


Fig. 16 *b.* — Support de pièce élastique permettant la libre dilatation.

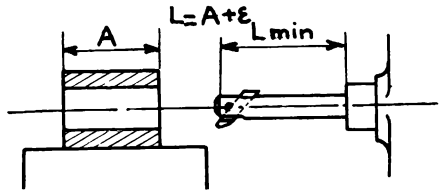
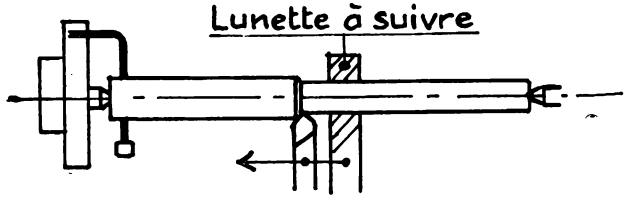


Fig. 17. — Il faut limiter au maximum le porte-à-faux des outils.

Fig. 18. — Les pièces flexibles seront soutenues près de l'effort de coupe : utilisation en tournage de la lunette à suivre.



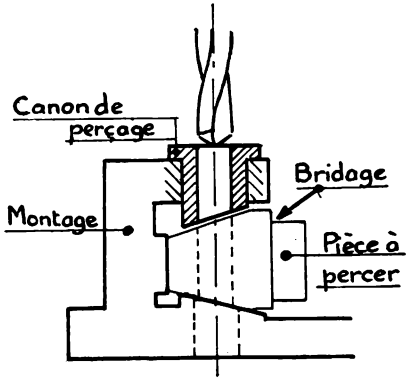


Fig. 19 *a.* — Les outils flexibles doivent être convenablement guidés, application au perçage.

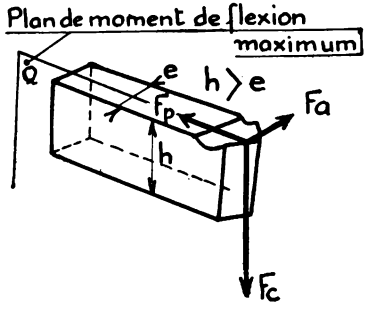


Fig. 20. — Plan de moment de flexion maximum.

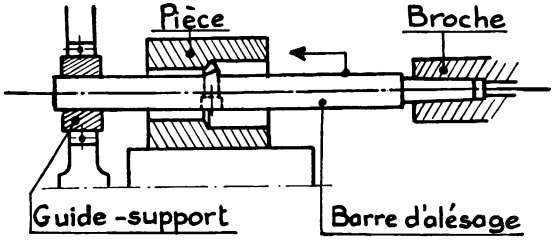


Fig. 19 *b.* — Les outils flexibles doivent être convenablement soutenus, application à l'alésage.

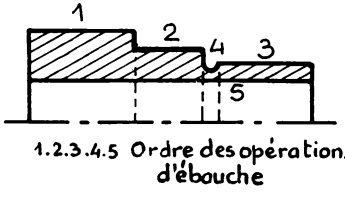


Fig. 21. — Les opérations affaiblissant le plus la pièce seront faites en dernier : ébauche de la gorge et alésage intérieur.

— prévoir des supports ou des guides pour les outils flexibles (*fig.* 19 *a* et 19 *b*),

— choisir pour les chariots supports de pièce ou d'outils une position leur assurant une assise stable avec le moindre porte-à-faux.

c) **Prendre des outils et porte-outils à grands moments d'inertie et conserver aussi longtemps que possible les sections maximum sur la pièce.**

— donner aux outils une section et une hauteur maximum (hauteur dans le plan de flexion, *fig.* 20),

— rechercher une gamme d'usinage qui assure le plus longtemps possible le maximum de rigidité aux pièces (*Exemple : fig.* 21) ; exécuter 1, 2, 3 puis gorge 4 et alésage 5 à la fin,

— limiter les efforts de coupe de façon à ne pas imposer à la pièce ou à l'outil des déformations excessives (réduire la section du copeau).

d) **Donner le plus de rigidité possible aux supports de pièce et d'outils :**

— régler le jeu des organes en mouvement : broches, chariots,

— vérifier fréquemment le blocage des écrous d'assemblage des différentes pièces constituant les supports de pièce ou d'outils,

— lorsque le réglage de la position de la pièce et de l'outil est assuré ne pas oublier de bloquer les chariots, le canon de la poupée mobile et de mettre les bretelles pour augmenter la rigidité des organes en porte à faux,

— concevoir des montages d'usinage rigides,

— rechercher un ablocage efficace des pièces,

— proportionner les efforts de coupe à la résistance des fixations.

Étude de l'usure des outils et des supports de pièce.

Usure des outils.

L'usure de l'outil au cours de la passe de finition doit être inférieure au quart de l'intervalle de tolérance.

L'usure d'un outil est fonction :

de sa dureté, de son échauffement, de son frottement sur le métal taillé, de l'usinabilité du métal travaillé.

Pour réduire l'usure il faut donc :

— préférer pour la finition l'outil à mise rapportée, en carbure métallique ou en diamant, à l'outil en acier rapide.

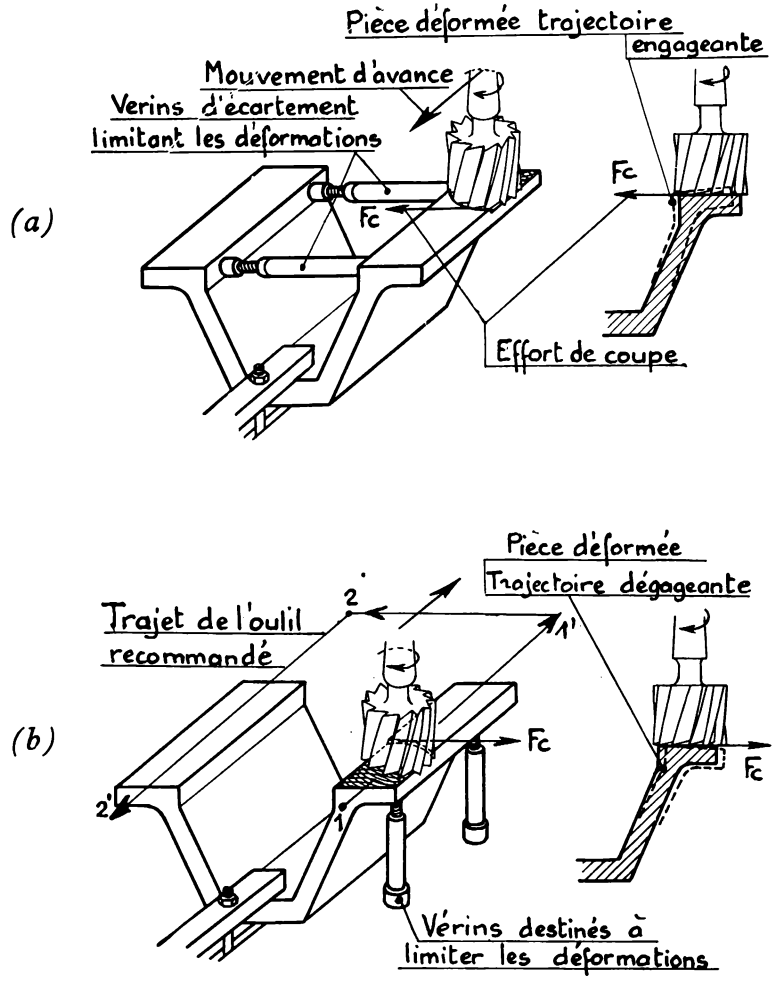


Fig. 22. — Disposition d'outil assurant une trajectoire dégageante.

Les flèches représentent les déplacements relatifs de la fraise par rapport à la pièce.

— arroser abondamment et donner à l'outil un faible angle de direction qui assure ainsi la répartition de la chaleur dégagée par la coupe sur une plus grande longueur d'arête tranchante (*fig.* 23),

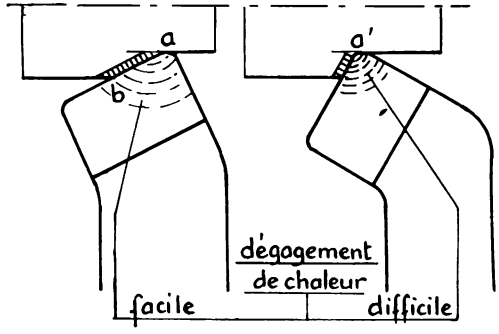


Fig. 23. — Un faible angle de direction permet un facile dégagement de chaleur.

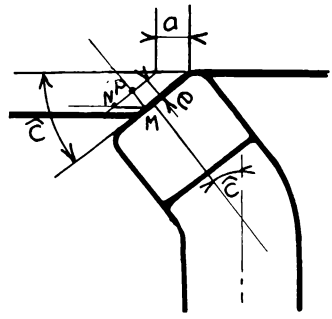


Fig. 24. — Détermination de l'épaisseur du copeau en fonction de l'angle de direction ; avance minimum.

— ne pas donner au copeau une épaisseur voisine de celle du copeau taillé minimum et pour cela :

— affûter très soigneusement l'outil pour que l'épaisseur minimum du copeau puisse atteindre $e = 0{,}05$ (*fig.* 24).

Ainsi si l'angle de direction de l'outil est $\widehat{c}$ et si a est l'avance par tour on peut écrire dans le triangle-rectangle MNP de la figure 24 :

$$a = \frac{e}{\sin c} \qquad \text{d'où} \qquad a \min = \frac{0{,}05}{\sin \widehat{c}}$$

$$\text{Si } \widehat{c} = 30^{\circ} \qquad a = \frac{0{,}05}{0{,}5} = 0{,}1$$

$$\text{Si } \widehat{c} = 20^{\circ} \qquad a = \frac{0{,}05}{0{,}34} = 0{,}15$$

$$\text{Si } c = 10^{\circ} \qquad a = \frac{0{,}05}{0{,}17} = 0{,}3$$

On remarque que, si l'angle $\widehat{c}$ diminue, l'avance par tour augmente et, pour une longueur à usiner déterminée, le nombre de tours pendant lesquels l'outil sera en contact avec la pièce diminue. Ainsi l'usure de l'outil sera réduite.

— disposer l'outil de façon que sa trajectoire soit dégageante (*fig.* 22 *a* et 22 *b*).

— améliorer l'usinabilité du métal, dans certains cas, par un recuit qui supprime l'écrouissage du métal résultant des opérations d'ébauche. Ce recuit se fait avant les opérations de demi-finition. L'usinabilité est aussi fonction de la structure du métal, structure qu'un traitement thermique, trempe et revenu à haute température, appliqué avant usinage, peut modifier avantageusement.

● **Conséquences des imperfections des machines-outils.**

Un jeu exagéré des broches et des chariots favorise le broutement des outils. Toute usure des glissières, toute déformation du bâti des machines, a pour effet de modifier la trajectoire théorique des chariots porte-outils ou supports de pièce et les imperfections de la machine sont reproduites sur la pièce.

L'achèvement des pièces devra donc toujours être effectué sur des machines-outils en excellent état. Ces machines seront parfaitement entretenues et conduites avec soin, en leur évitant toute surcharge.

Approche de l'état microgéométrique idéal.

Les défauts microgéométriques apparaissent sous l'aspect de rayures tracées par l'outil sur la surface usinée. La profondeur de ces rayures est amplifiée par les vibrations de la machine, de l'outil et de la pièce, sous l'effet des variations périodiques des efforts de coupe.

Afin de réduire l'importance des sillons laissés par l'outil, il faut :

a) *Modifier la forme de l'outil et ses conditions de coupe.*

— diminuer l'angle de direction, arrondir l'angle de pointe, affiner l'arête tranchante ;

— réduire l'épaisseur du copeau pour supprimer les arrachements de matière : diminuer l'avance et la profondeur de passe ;

— la coupe du métal par un outil à pente négative améliore l'état de surface ; cette constatation conduit à utiliser, pour les opérations de finition :

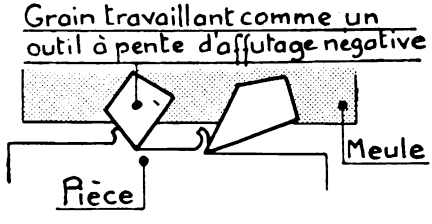


Fig. 25. — Les grains d'abrasif d'une meule travaillent comme des outils à pente d'affûtage positive ou négative.

— l'outil en carbures métalliques à pente négative,

— la meule, le rodoir garni de pierre à finir ou de potée d'émeri. On notera, à ce sujet, qu'une bonne partie de l'abrasif travaille comme des outils à pente négative (*fig.* 25),

— le grattoir (de plus en plus rarement grâce aux progrès de la rectification fine).

b) *Réduire les vibrations de la machine, de la pièce, de l'outil.*

Ces vibrations seront atténuées si :

— les efforts mis en jeu sont faibles (petite section de copeau, outil bien affûté, lubrification abondante),

— l'outil est rigide,

— la pièce bien soutenue et équilibrée,

— la machine rigide et en parfait état mécanique (pas de jeu dans les organes mobiles, équilibrage des organes en rotation, etc.) Ceci conduit à affecter d'excellentes machines aux travaux de finition et, en fabrication sérielle, à les réserver à ces seuls travaux.

Les vibrations causées par la variation périodique de l'effort de coupe sont inévitables ; mais on doit s'efforcer de leur conserver une amplitude constante : ceci suppose que le copeau taillé par l'outil de finition a partout la même épaisseur. D'où la nécessité de réaliser avec soin les opérations de demi-finition (deux passes de demi-finition sont parfois nécessaires).

POSITIONS RELATIVES DES DIFFÉRENTES SURFACES USINÉES

Utilisation rationnelle des machines-outils

Les différentes surfaces usinées qui limitent les pièces occupent les unes par rapport aux autres, dans la majorité des cas, les positions suivantes :

a) ***Surfaces de révolution.***

— axes confondus (concentricité de surfaces tournées, par exemple),
— axes perpendiculaires ou obliques concourants,
— axes perpendiculaires ou obliques non concourants ;

b) ***Surfaces planes.***

— parallèles,
— perpendiculaires,
— obliques.

Les machines-outils comportent généralement :

— des chariots (supports d'outils ou de pièces), dont les déplacements rectilignes sont orthogonaux ;
— des broches (supports d'outils ou de pièces), animés d'un mouvement de rotation d'axe parallèle ou perpendiculaire aux déplacements des chariots. Les broches peuvent aussi se déplacer suivant leur axe.

Les positions relatives de ces chariots et de ces broches, au cours de leurs déplacements, doivent être garanties avec une précision supérieure à celle des pièces à exécuter.

La précision exigible des machines-outils est définie par les normes de réception Salmon Schlesinger. Il faut vérifier périodiquement la précision des machines-outils en service, notamment de celles utilisées pour les opérations de finition.

Étude de l'organisation de l'usinage.

Imaginons, sur une pièce (voir *fig.* 26), l'usinage de deux surfaces, S1 et S2, supposées parallèles.

Premier cas.

Les surfaces peuvent être usinées avec le même outil.

La surface S1 étant réalisée, il suffit, sans démonter la pièce, de déplacer le chariot par rapport à l'outil, de la cote *r*, pour obtenir la surface S2 à la précision près de la machine, à condition qu'on n'ait pas commis d'erreur de lecture en déplaçant le chariot.

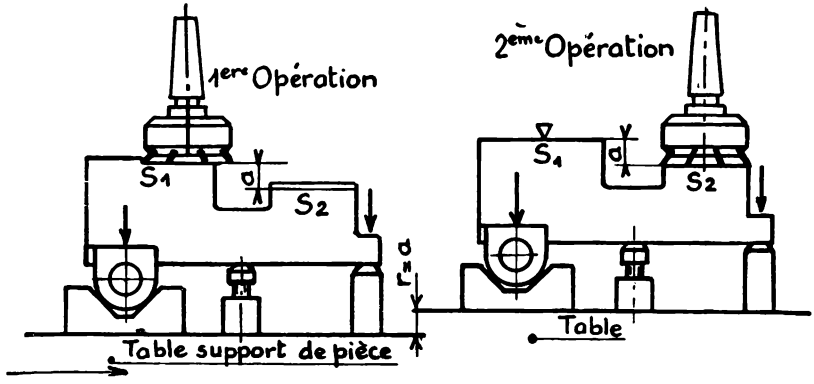


Fig. 26. — Pièce en cours d'usinage.

Si, après l'usinage de S1, la pièce était démontée, il faudrait, en la remontant sur la table de la machine pour terminer l'usinage, s'assurer, après bridage, que S1 est bien parallèle au plan des deux directions horizontales de déplacement du porte-pièce. Le réglage de la pièce, contrôlé au comparateur, peut être long, surtout si la surface est brute.

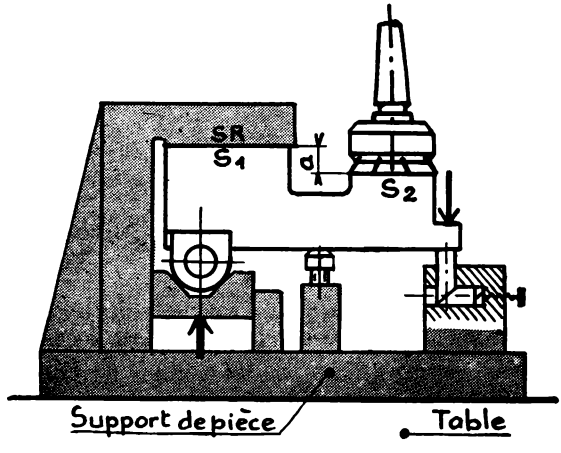


Fig. 27. — Usinage de S_2 en fabrication de série.

En fabrication sérielle, si l'on devait séparer les usinages de S1 et de S2, on éviterait ce réglage en appuyant la surface S1, usinée en premier lieu (surface de référence), contre un support fixé à la table de la machine (montage d'usinage). La surface SR du support doit être, dans ce cas, parallèle à la table de la machine (*fig.* 27). On conçoit aisément qu'il est plus logique d'usiner successivement S1 et S2 sans démonter la pièce, on fait ainsi l'économie d'un montage.

Il est donc possible d'énoncer la règle générale :

Il faut usiner, avec le même outil, le plus possible de surfaces sans démonter la pièce.

Le respect de cette règle, imposée par le souci de la précision, permet en outre de supprimer les temps improductifs de montage et démontage des pièces.
Il a fait concevoir des machines à cycle automatique : tours révolvers, automatiques, machines à tranfert, etc.

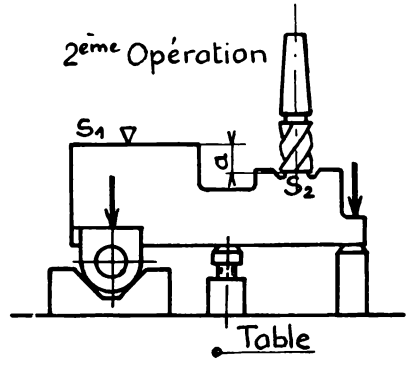


Fig. 28. — L'usinage successif de deux surfaces parallèles S_1 et S_2 nécessite un changement d'outil.

Deuxième cas.

Les surfaces ne peuvent pas être usinées avec le même outil.

Reprenons sur l'exemple précédent (*fig.* 28) l'usinage de la surface S2.

a) **En fabrication de série,** nous avons le choix entre deux solutions :

— usiner successivement S1 et S2, en laissant la pièce immobile sur la table, et en changeant d'outil ;

— usiner S1 sur toutes les pièces avec l'outil 1, puis, sur la même machine, ou

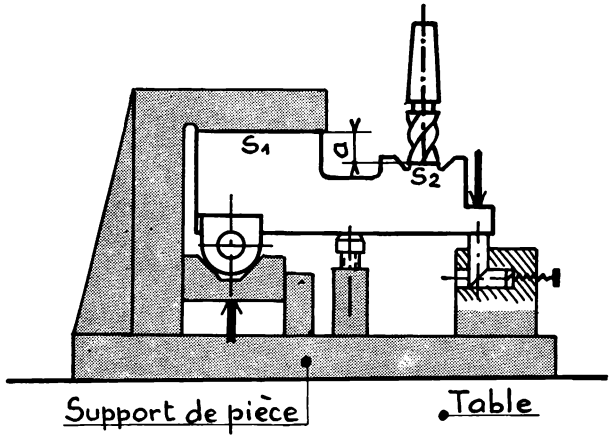


Fig. 29. — Usinage de S_2, en fabrication de série.

sur une autre équipée d'un porte-pièce et de l'outil 2, exécuter successivement sur toutes les pièces la rainure S2 (*fig.* 29).

La solution adoptée sera celle qui procurera une économie de temps.
Si le changement d'outil est plus rapide que le changement de pièce, on adoptera la solution 1.

Exemples : tours à tourelle révolver, tours automatiques ; machines à outils multiples fonctionnant simultanément.
La règle énoncée précédemment est donc valable.

Si le changement d'outil est moins rapide que le montage et le démontage des pièces on peut adopter la solution 2, à condition, toutefois, que l'importance de la série permette une économie de temps qui assure l'amortissement du porte-pièce d'usinage. La règle n'est plus valable.

Exemples : en général, travail sur machines banales : fraiseuses, étaux-limeurs, perceuses, machines à rectifier, et, quelquefois, sur tours parallèles.

b) **En fabrication unitaire ou en très petite série,** la deuxième solution ne peut être retenue, parce que le nombre de pièces ne permet pas d'amortir l'outillage spécial. La règle précédemment énoncée reste donc valable : il faut usiner, avec le même outil, le plus de surfaces possible sans démonter la pièce.

Contrôle des déplacements

La précision des usinages successifs des différentes surfaces est fonction de la précision des déplacements des chariots supports d'outil ou de pièce.

a) Sur la majorité des machines-outils, les tambours gradués des vis de commande des chariots ne permettent pas toujours de mesurer les déplacements avec une précision suffisante. Il est alors préférable de contrôler le déplacement des chariots soit en mesurant directement la cote sur la pièce, soit en utilisant des cales étalons ou des piges calibrées (*fig.* 30).

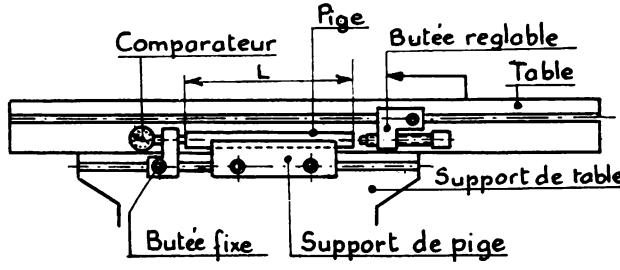


Fig. 30. — Contrôle des déplacements d'une table de fraiseuse.

Dans ce dernier cas les cales ou piges sont placées entre deux butées, l'une liée au chariot mobile et l'autre à une partie fixe (bâti). L'une de ces butées permet de régler la pression de contact grâce à l'association : touche coulissante, ressort, amplificateur.
En substituant une pige *l* à une pige L on peut déplacer rigoureusement le chariot de L — *l* si l'aiguille du comparateur reste au zéro.

b) En fabrication de série on généralise le « travail en butée », qui rend le contrôle des déplacements plus précis et plus rapide.

Si les déformations pige-butées sont inférieures au quart de la tolérance quelle que soit la pression de contact, on peut se dispenser d'utiliser une butée à contrôle de pression. On réduit ainsi les temps de manœuvre.

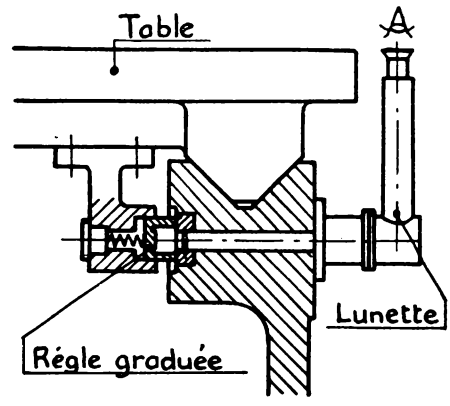


Fig. 31. — Contrôle des déplacements par lecture optique sur règle graduée de précision.

c) Sur certaines machines conçues pour l'exécution de travaux précis (machines à pointer, machines à rectifier), la lecture des déplacements peut se faire directement : soit à travers un dispositif optique sur une règle en invar graduée finement (*fig.* 31) soit sur un tambour avec un système correcteur des erreurs du pas de la vis de commande des chariots.

Opérations de reprise

L'usinage d'une pièce nécessite généralement l'utilisation de plusieurs machines-outils et, sur chacunes d'elles, le déplacement de la pièce par rapport à l'outil.
Les différentes étapes de l'usinage d'une pièce peuvent être définies comme suit :

Opération d'usinage.

Elle correspond à la mise en action d'un outil ou d'un groupe d'outils taillant ensemble.

Exemple : Action d'un outil monté sur la tourelle d'un tour semi-automatique, Si cette tourelle est équipée de 6 outils ou de 6 groupes d'outils, l'évolution complète de la tourelle correspond à 6 opérations.

Sous-phase d'usinage.

Elle représente l'ensemble des opérations exécutées par un ouvrier à un même poste de travail, sans qu'il ait à démonter ni à déplacer la pièce.

Phase d'usinage.

Elle est l'ensemble des opérations effectuées à un poste de travail avec ou sans démontage ou déplacement de la pièce en utilisant la même machine ou le même équipement.

Exemples de phases : traçage, fraisage, tournage, montage, etc.

Pour la première opération d'usinage la pièce repose nécessairement sur son support par l'intermédiaire de surfaces brutes ; sa position par rapport à l'outil doit être définie en se référant à son tracé préalable ou à des calibres (silhouettes) qui dispensent d'établir le tracé (*fig.* 32).

Pour les sous-phases suivantes, la pièce prendra appui sur son support par la première surface de référence usinée et elle sera orientée convenablement.

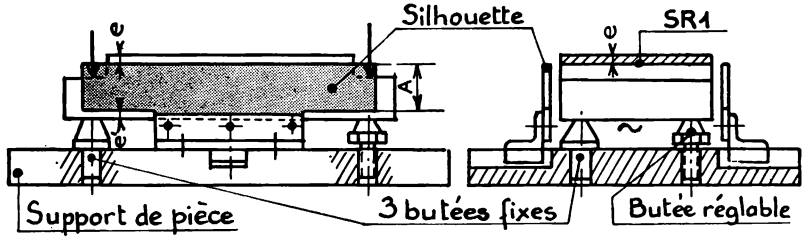


Fig. 32. — Utilisation de silhouettes pour régler la position de l'outil au cours de l'usinage en série (suppression du traçage). Les butées fixes sont en réalité des butées réglables immobilisées. La butée réglable est souvent une butée automatique.

Les ***règles de travail pour les travaux de série*** apparaissent dès lors clairement sur la figure 33.

La première sous-phase d'usinage a pour objet de réaliser sur la pièce une ou plusieurs surfaces servant de point de départ aux opérations d'usinage. Ces surfaces comprendront au moins une surface de référence ou, exceptionnellement, une surface parallèle (surface de reprise). On choisira, de préférence, la surface de référence ou la surface de reprise qui assurera à la pièce la meilleure assise pour les opérations ultérieures.

Les sous-phases d'usinage suivantes ont pour objet la réalisation des deux autres surfaces de référence ou, si c'est nécessaire, des surfaces de reprise parallèles.

Lorsque la première surface de référence (ou de reprise) est usinée la pièce prend appui sur son support par cette surface pour l'exécution de la deuxième sous-phase d'usinage.

Lorsque deux surfaces de référence (ou de reprise) sont usinées la pièce prend appui sur son support en vue de la sous-phase d'usinage suivante par la première surface de référence usinée et est dégauchie par mise en contact de la seconde surface de référence usinée avec deux points A_1 et A_2 du support.

Lorsque les trois surfaces de référence (ou de reprise) sont usinées la pièce prend contact avec le support, en vue des phases d'usinage ultérieures, de la façon suivante :

— appui sur la première surface de référence,

— orientation : contact en 2 points avec la seconde surface de référence,
contact en 1 point avec la troisième.

Ces règles sont valables pour les opérations d'ébauche et pour les opérations de finition.

Les supports d'usinage conçus en application de ces règles sont difficiles à réaliser avec précision ; le dispositif d'ablocage est compliqué, puisqu'il faut exercer sur la pièce des efforts perpendiculaires aux trois surfaces de référence (voir *fig.* 33).

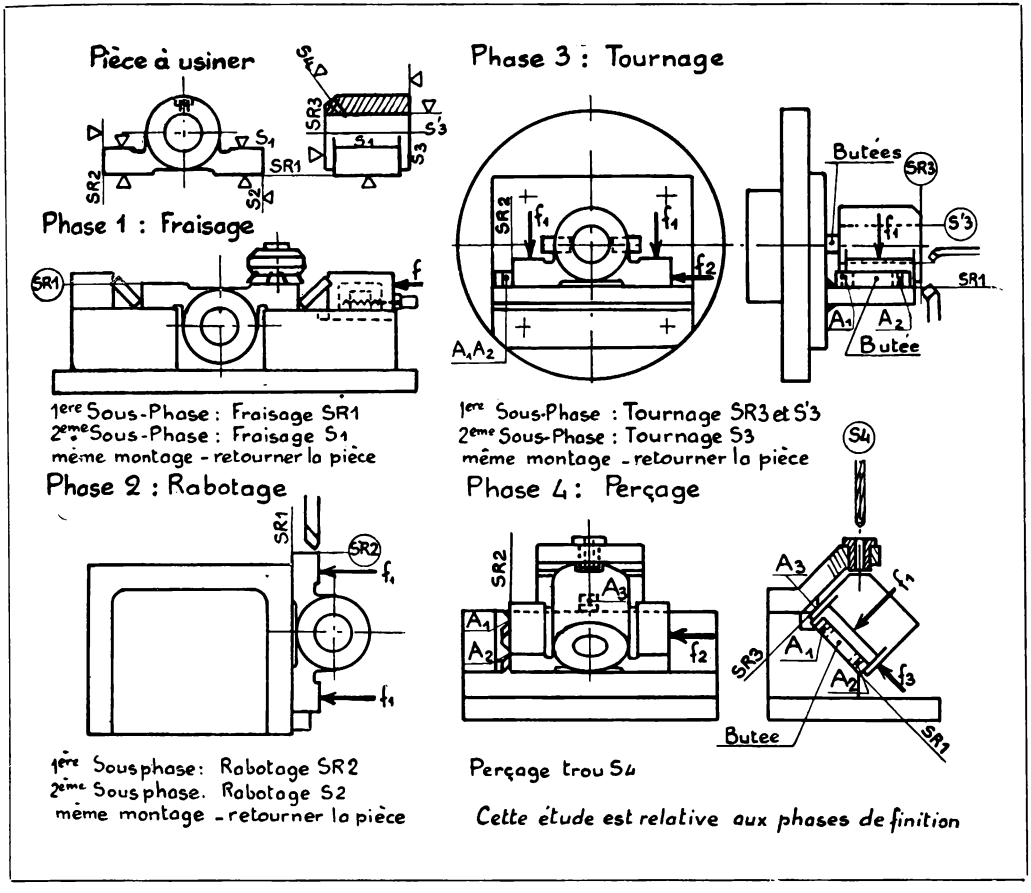


Fig. 33. — Choix de l'ordre des phases principales : exemple concret.

Pour simplifier l'exécution des porte-pièces indispensables aux fabrications de série, on préfère actuellement appuyer la pièce sur la surface de référence obtenue en première opération, et la dégauchir au moyen de deux broches (pieds) de centrage cylindriques, ajustés *h* 6 ou *g* 6 dans deux trous alésés H7 dans la pièce (voir *fig.* 34).

La fixation de la pièce sur son support ne nécessite plus que des efforts suivant f1 les doigts de dégauchissage équilibrant les composantes de l'effort de coupe situées dans un plan perpendiculaire à leur axe.

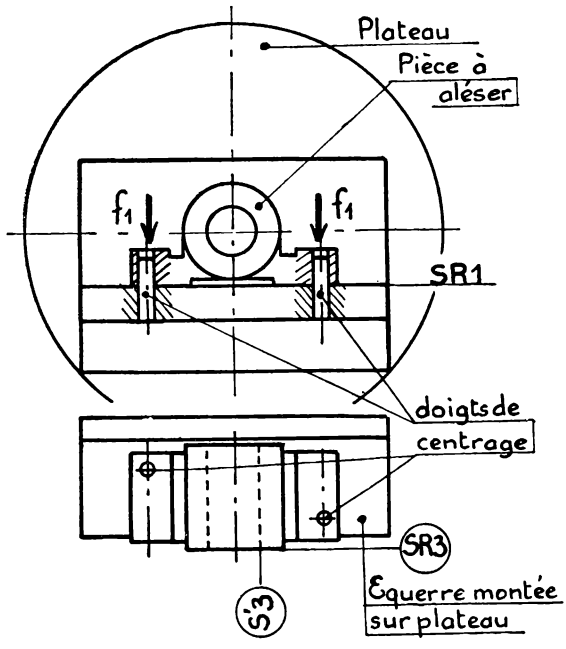


Fig. 34. — Simplification des montages d'usinage en utilisant des doigts de centrage.

Les alésages dans la pièce peuvent être des trous destinés à son assemblage.

Lorsque la pièce ne comporte aucun trou on crée ces alésages indispensables à l'usinage en accord avec le Bureau des Études.

Pour assurer à ces alésages un entraxe identique sur chacun des porte-pièces on les réalise avec un gabarit de perçage.

Ce procédé assure non seulement une simplification de l'outillage, mais aussi un gain de temps de montage appréciable.

RAPIDITÉ D'EXÉCUTION

La durée totale d'un usinage est une somme de temps partiels qui se répartissent en :

— *temps de préparation :*

montage et réglage des appareillages sur la machine, montage et réglage des outils, démontage des outils et appareillages en fin de travail, nettoyage ;

— *temps de coupe ;*

— *temps de manipulation :*

montage et démontage des pièces, changement d'outils, prise de la passe, arrêt et mise en marche de la machine, contrôles ;

— *temps de repos* accordé à l'ouvrier.

Pour exécuter plus rapidement une pièce il faut réduire autant qu'il est possible chacun de ces temps.

Un chapitre de la 2e partie, classe de 1re sera consacré à cette étude.

Toutefois, avant d'aborder l'examen des différents procédés de réalisation des surfaces, il nous faut dès maintenant dégager les grands principes conduisant à la réduction du temps de coupe.

Ébauche

Réduire le plus possible le nombre de passes.

Ceci suppose une augmentation de la profondeur de passe, et, par conséquent, de gros efforts de coupe qui exigent :

— une machine robuste utilisée à pleine puissance,

— une pièce convenablement fixée,

— des outils de rigidité maximum,

— un dégagement facile des copeaux.

Rechercher des conditions de travail permettant de réaliser une masse de copeau maximum pendant l'unité de temps d'usinage.

a) **Calcul de la masse de copeau produite par minute.**

Si ω = la masse de copeau en kg/mn,

a = l'avance exprimée en dm,
par coup d'outil dans le cas du rabotage,
par tour de pièce dans le tournage, (*fig.* 35),

p = la profondeur de passe exprimée en dm,

V = la vitesse de coupe en dm/mn,

et d = la masse spécifique en kg/dm³,

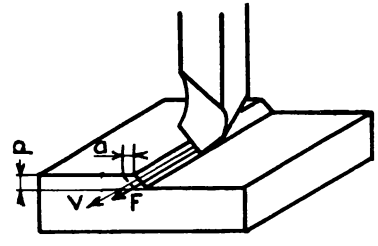


Fig. 35. — Recherche des conditions d'usinage les plus avantageuses.

la section du copeau S a pour valeur $S = ap$.

La longueur de copeau produite par minute est mesurée pratiquement par le même nombre que la vitesse de coupe V.

Le volume du copeau obtenu par minute est $VS = Vap$ et la masse en kg/mn a pour valeur :

$$\omega = dVS = dVap.$$

Cette masse de copeau sera maximum si la vitesse de coupe V et la section de copeau sont maximum.

Ainsi se trouvent justifiés les outils en carbures métalliques qui permettent de grandes vitesses de coupe, les machines puissantes et les copeaux de forte section.

b) **Choix de a et de p.**

Pour des opérations d'ébauche, la qualité de l'état de surface importe peu : on choisit de fortes avances.

On a, d'autre part, intérêt à faire fonctionner les machines-outils à leur puissance maximum.

● *Choix de* a *et* p *en considération de la puissance absorbée.*

L'étude expérimentale relative à la puissance W absorbée par la coupe est donnée, selon certains auteurs, par la relation :

$$W = KVap \tag{1}$$

où K est un coefficient qui dépend du mode de travail, de la forme de l'outil utilisé et de l'usinabilité du métal travaillé.

Mais les différents éléments de la coupe sont également liés entre eux par la relation du Commandant Denis, établie pour les outils en acier à coupe rapide :

$$V^3a^2p = C^3 = \text{constante}$$

d'où l'on tire

$$V = \frac{C}{(a^2 \cdot p)^{\frac{1}{3}}} = \frac{C}{a^{\frac{2}{3}} \cdot p^{\frac{1}{3}}} = \frac{C}{a^{0,66} \cdot p^{0,33}} \tag{2}$$

En reportant cette valeur de V dans la relation (1), il vient :

$$W = K \cdot C \cdot a^{0,33} \cdot p^{0,66} \tag{3}$$

Conclusion. — Pour enlever un poids donné de copeaux avec le minimum d'énergie électrique dépensée il vaut mieux réduire l'avance et augmenter la profondeur de passe puisque l'exposant de a est 2 fois plus petit que celui de p. Mais il importe que l'avance choisie a ne dépasse pas quelques dixièmes de millimètres afin que le copeau puisse s'enrouler correctement.

● *Choix de* a *et* p *en considération de la flexion de l'outil.*

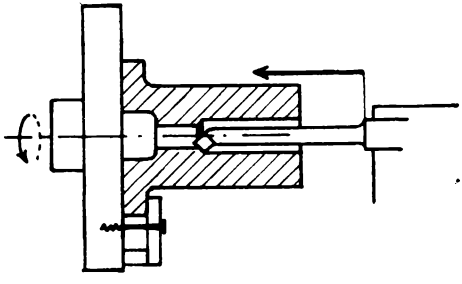


Fig. 36. — Le travail d'ébauche peut être limité par la résistance de l'outil : application à l'alésage profond.

Le travail d'ébauche peut être limité par la flexion de l'outil (alésage à l'outil par exemple) (*fig.* 36).

La contrainte du métal de l'outil et la flèche prise sont proportionnelles à l'effort de coupe $Fc = KS$.

(S étant la section du copeau et K la résistance spécifique de coupe.)

Fc a donc une valeur limite maximum et, par suite, la section du copeau qui peut être produit par un outil déterminé a, elle aussi, une valeur maximum $S_1 = S = ap$.

a et p peuvent donc être librement choisis sous la seule condition

$$ap = S_1.$$

Mais, si on ajoute à cette condition de résistance l'impératif de produire un débit de copeau maximum entre deux affûtages de l'outil, on verra plus loin que l'on a intérêt à choisir une grande profondeur de passe et une petite avance.

● *Choix de* a *et* p *en considération de la résistance de la pièce.*

La déformation d'une pièce flexible ne doit jamais devenir permanente au cours du travail. Il faut veiller à ce que les déformations subies demeurent élastiques, et, en outre, à ce qu'elles soient inférieures au quart de l'intervalle de tolérance.

La *figure* 37 montre, pour les travaux de tournage, les cas où la déformation est maximum. Les formules de la flexion permettent d'établir les valeurs de F en fonction des flèches, donc celle des sections S de copeau, puisque $Fc = KS = K \cdot a \cdot p$. a et p peuvent être choisis librement mais comme précédemment il vaut mieux prendre a petit.

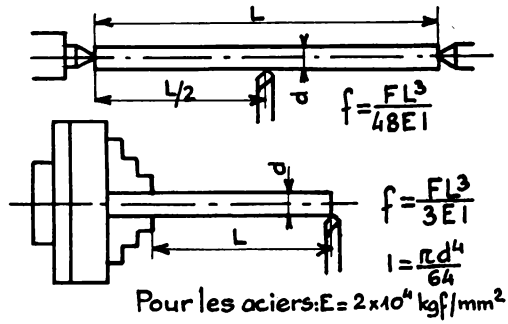


Fig. 37. — Position de l'outil de tour correspondant au maximum de déformations.

Quand le rapport l/D est supérieur à 15, il faut soutenir la pièce avec une lunette fixe, ou une lunette à suivre à touches prismatiques ou à galets.

● *Choix de* a *et* p *en considération de la masse de copeau enlevée.*

Nous supposerons que le copeau a une section constante $S = ap$.

Si nous désignons par :

d la masse spécifique du métal, en kg/dm³,

V la vitesse de coupe en dm/mn,

a et p les dimensions du copeau en dm,

la masse de copeaux produite par mn, exprimé en kg/mn, est :

$$\omega = dVap$$

Mais, d'après la loi du Commandant Denis :

$$V = \frac{C}{a^{\frac{2}{3}} \cdot p^{\frac{1}{3}}},$$

d'où

$$\omega = \frac{d \cdot C \cdot a \cdot p}{a^{\frac{2}{3}} \cdot p^{\frac{1}{3}}} = d \cdot C \cdot a^{\frac{1}{3}} \cdot p^{\frac{2}{3}} = d \cdot C \cdot (a \cdot p^2)^{\frac{1}{3}}$$

D'où on tire $\omega = d \cdot C \cdot S^{\frac{1}{3}} \cdot p^{\frac{1}{3}}$.

Conclusion. — Pour une section de copeau donnée, il est plus économique d'augmenter *p* et de diminuer *a*.

Finition

Les opérations de finition ont pour objet la précision et la qualité de l'état de surface.

Les défauts microgéométriques traduits par les rayures laissées par l'outil peuvent être atténués en diminuant la profondeur de coupe, l'avance par tour ou par coup, et en modifiant la forme de la partie active de l'outil (petit angle de direction, arrondi de la pointe).

Les défauts macrogéométriques qui résultent de l'usure de l'outil au cours du travail, sont à éviter surtout dans les travaux de série sur machines automatiques, ou lorsqu'on utilise des outils de forme (alésoirs).

Pour réduire l'usure de l'outil il faut :

a) choisir une vitesse de coupe voisine de la vitesse de moindre usure,.
b) éliminer, par un arrosage abondant, les calories produites,
c) supprimer les frottements exagérés résultant de la formation d'un copeau inférieur au copeau taillé minimum,
d) diminuer, pour un travail déterminé, le temps de contact de l'outil et de la pièce,
e) éviter la formation du copeau adhérent (lubrification).

Recherchons comment réduire le temps de coupe.

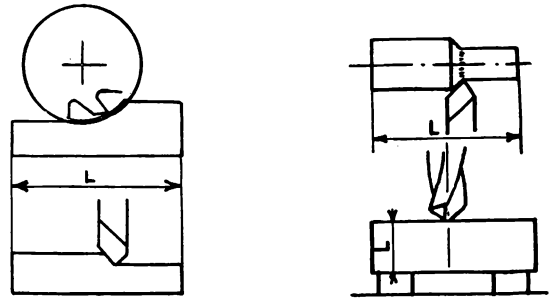


Fig. 38. — Longueur de la surface à usiner.

Si on désigne (*fig.* 38) par :

L la longueur de la pièce à usiner, exprimée en m,
A l'avance, exprimée en m/mn,
a l'avance, exprimée en m par coup d'outil, tour de pièce...,
n le nombre de coups ou de tours par minute,
t le temps nécessaire à l'usinage, exprimé en mn,
on peut écrire :

$$t = \frac{L}{A} \qquad A = a \cdot n \qquad d'où \qquad t = \frac{L}{a \cdot n}$$

On voit que le temps de travail sera d'autant plus réduit que l'avance par coup ou par tour sera plus grande.

Il faudra donc choisir, pour la finition, l'avance par tour ou par coup maximum qui donne, compte tenu de la forme de l'outil, un état de surface acceptable. Prendre systématiquement une avance très faible pour la finition est donc très souvent une erreur.

On peut obtenir un excellent résultat par une étude sérieuse du bec de l'outil.

Opérations d'usinage à prévoir.

Le nombre des opérations d'usinage à prévoir est évidemment fonction de la précision à atteindre.

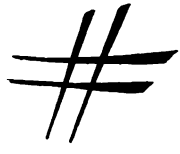
Pour les qualités 8, 7, 6, 5, on prévoit les opérations suivantes :

— ébauche : 1 ou plusieurs passes,
— demi-finition : 1 passe,
— finition : 1 passe.

Pour qualités 8 et 9 :

— ébauche : 1 ou plusieurs passes,
— finition : 1 passe.

Pour qualités 10, 11, 12, une ébauche à avance réduite peut suffire.



Réalisation des surfaces planes

PRINCIPES

Il est souvent commode de considérer une surface comme l'enveloppe des positions successives occupées dans l'espace par une ligne G, appelée génératrice, liée géométriquement à une autre ligne Δ, appelée directrice.

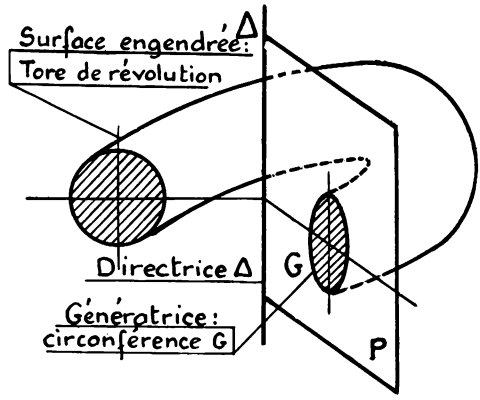


Fig. 1. — Génération du tore de révolution.

La directrice Δ peut être fixe dans l'espace ; la génératrice G est alors mobile.

La directrice Δ peut être mobile dans l'espace ; dans ce cas, la génératrice G peut être : soit fixe par rapport à Δ, soit mobile par rapport à Δ.

Exemple : le tore de révolution (voir *fig.* 1).

- — génératrice : circonférence G,
- — directrice : droite Δ,
- — liaison géométrique entre G et Δ : Δ est dans le plan G,
- — mouvement de la directrice : Δ est fixe,
- — mouvement de la génératrice : G tourne autour de Δ.

En appliquant au plan cette méthode de génération on en déduit le principe des machines-outils destinées à exécuter les surfaces planes. Mais tous les cas de génération des surfaces reposent sur leurs propriétés géométriques. Voici les principales propriétés géométriques du plan :

- — une droite qui a deux points communs avec un plan est tout entière contenue dans le plan.
- — deux droites parallèles déterminent un plan.
- — une droite est perpendiculaire à un plan lorsqu'elle est orthogonale à toutes les droites de ce plan.
- — deux plans perpendiculaires à une même droite, qui ont un point commun, sont confondus.

Elles ont permis d'établir les différentes méthodes de génération du plan :

Première méthode (voir *fig.* 2)

— La génératrice G est un segment de droite AB.
— La directrice Δ est une droite.
— Les droites G et Δ ont un point commun : A.
— La directrice Δ est fixe dans l'espace.
— La génératrice G est animée d'une translation rectiligne, A parcourant Δ.

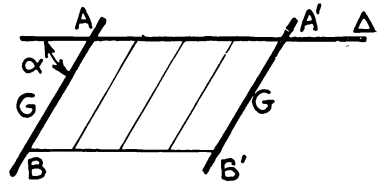


Fig. 2. — Génération du plan : génératrice droite G. Directrice droite Δ. Mouvement : translation de G. Applications : rabotage et rectification avec meule tangente.

La surface engendrée par AB *est donc une surface plane : parallélogramme, ou rectangle si l'angle* α *est droit.*

Deuxième méthode (*fig.* 3 et *fig.* 4)

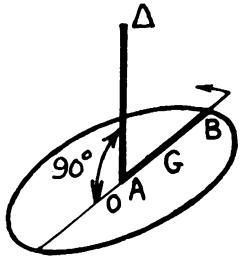


Fig. 3. — Génération du plan : génératrice G : droite AB. Directrice droite Δ. Mouvement : rotation de G.

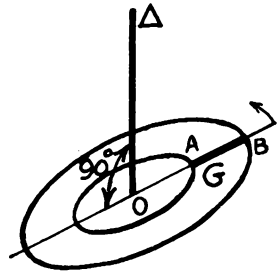


Fig. 4. — Génération du plan : même principe que pour fig. 3. Application : tournage.

— La génératrice G est un segment de droite AB.
— La directrice Δ est une droite.
— Les droites Δ et G ont un point commun : O, et sont perpendiculaires.
— La directrice Δ est fixe dans l'espace.
— La génératrice G est animée d'une rotation autour de Δ.

La surface engendrée par la génératrice AB *est un cercle* (*fig.* 3) *ou une couronne circulaire* (*fig.* 4).

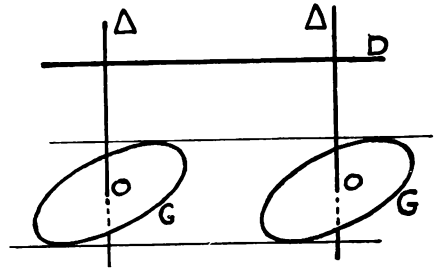


Fig. 5. — Génération du plan : génératrice G circonférence. Directrice droite Δ. Mouvement : G et Δ solidaires sont animés d'une translation rectiligne. Applications : fraisage et rectification avec meule boisseau.

Troisième méthode (*fig.* 5)

— La génératrice G est une circonférence.

— La directrice Δ est une droite.

— La droite Δ est perpendiculaire au plan de la circonférence G et passe par son centre O.

— La directrice Δ est animée d'une translation rectiligne suivant une direction D parallèle au plan de la circonférence G.

— La génératrice G est fixe par rapport à la directrice Δ.

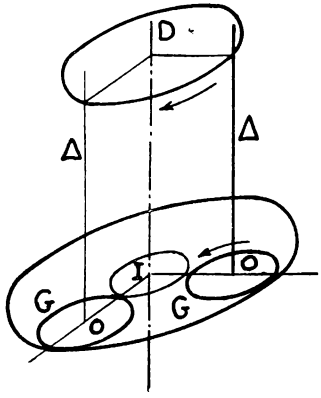


Fig. 6. — Génération du plan. Génératrice G circonférence. Directrice droite Δ. Mouvement G et Δ solidaires sont animés d'une rotation autour de D. Applications : fraisage et rectification sur plateau circulaire.

La surface engendrée par la circonférence G *est une surface plane formée d'un rectangle et de deux demi-cercles.*

Quatrième méthode (*fig.* 6).

— La génératrice G est une circonférence.

— La directrice Δ est une droite.

— La droite Δ est perpendiculaire au plan de la circonférence G et passe par son centre O.

— La directrice Δ est animée d'une rotation autour d'un axe D qui lui est parallèle.

— La génératrice G est fixe par rapport à la directrice.

La surface engendrée par G *est une couronne.*

Les procédés d'usinage du plan sont des applications de ces méthodes de génération.

1° La génératrice G correspond à l'outil.

Elle peut être :

a) réelle : arête tranchante d'un outil (voir *fig.* 7).

b) fictive : trajectoire de la pointe d'un outil (voir *fig.* 8). Le déplacement communiqué à l'outil pour que sa pointe décrive la génératrice G exige des guidages appartenant au support d'outil ou au support de pièce.

2° La directrice Δ est matérialisée par les guidages du support d'outil ou du support de pièce : paliers ou glissières.

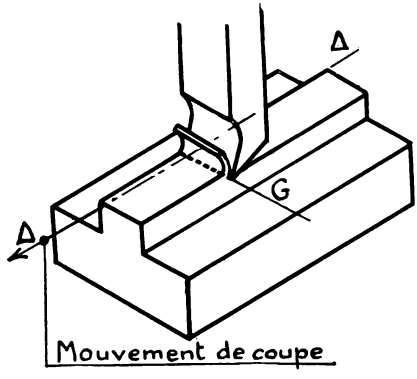


Fig. 7. — Exécution du plan à l'outil de forme par rabotage.

3° La position de la génératrice par rapport à la directrice est obtenue :

— pour une génératrice réelle, au moment du montage de l'outil ;

— pour une génératrice fictive, automatiquement : ce sont les guidages de la machine-outil qui assurent cette mise en position.

4° Le mouvement de la génératrice G par rapport à la directrice Δ peut être communiqué indifféremment à l'outil ou à la pièce : seul compte le mouvement relatif de G par rapport à Δ.

5° Le mouvement d'entraînement de la directrice Δ exige des guidages supplémentaires sur la machine-outil.

En conséquence

Les machines les plus simples sont celles qui utilisent une génératrice réelle, c'est-à-dire un *outil de forme*. Les plus complexes réalisent la génératrice fictive : il faut un deuxième groupe de guidages pour la produire.

Enfin, dans le cas où Δ est entraînée, la même complication apparaît pour réaliser la directrice supplémentaire D.

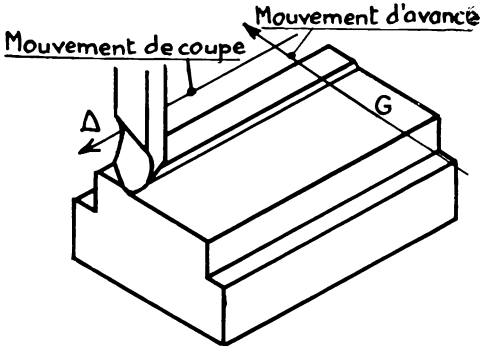


Fig. 8. — Exécution du plan à l'outil d'enveloppe par rabotage.

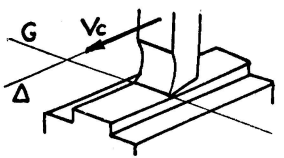
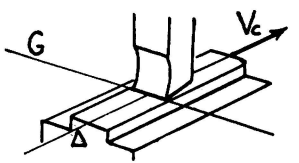
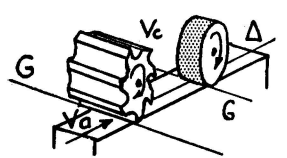
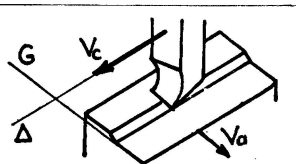
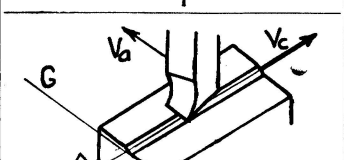
Dans ces deux derniers cas, *l'outil* est dit *d'enveloppe*, c'est généralement un *outil normalisé* : le plan réalisé est l'enveloppe de ses différentes positions.

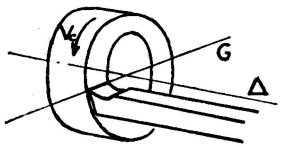
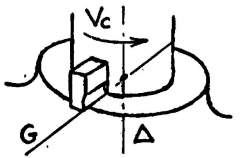
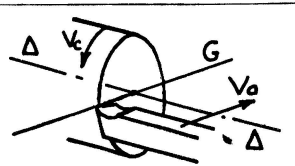
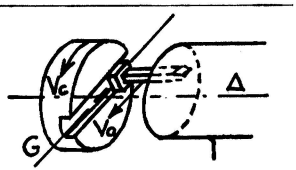
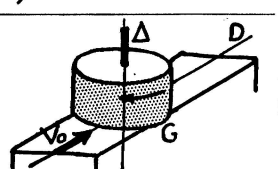
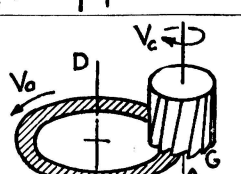
L'outil de forme est plus coûteux, plus délicat à réaliser ; la précision du travail dépend des moyens, en machines et en personnel, de l'atelier central d'outillage.

Pour l'outil d'enveloppe, la précision est surtout fonction de celle de la machine : le constructeur doit la donner et le service d'entretien la conserver ou la rétablir.

Toutes les machines comportent évidemment un chariot (porte-outil ou porte-pièce) permettant le réglage de l'outil.

USINAGE DU PLAN

Procédé	Méthode	Génératrice G	Directrice Δ	Machine	Porte-outil	Porte-pièce
	1re	Réelle. Matérialisée par l'outil de forme : pelle, à saigner, couteau. Broche.	Glissières du coulisseau porte-outil.	Etau-limeur. Machine à brocher.	Mobile. Mouvement de coupe rectiligne.	Fixe.
	1re	Réelle. Matérialisée par l'outil de forme : pelle, à saigner, couteau.	Glissières de la table porte-pièce.	Machine à raboter.	Fixe.	Mobile. Mouvement de coupe rectiligne.
	1re	Réelle. Lèvres d'une fraise roulante à une taille ou génératrice d'une meule.	Glissières de la table porte-pièce.	Machine à fraiser. Machine à rectifier plane à meule tangente.	Mobile. Mouvement de coupe circulaire.	Mobile. Mouvement d'avance rectiligne.
	1re	Fictive. Assurée par les glissières de la table porte-pièce. Outil d'enveloppe à charioter ou à dresser.	Glissières du coulisseau porte-outil.	Etau-limeur.	Mobile. Mouvement de coupe rectiligne.	Mobile. Mouvement d'avance rectiligne.
	1re	Fictive. Assurée par les glissières du coulisseau porte-outil. Outil d'enveloppe à charioter ou à dresser.	Glissières de la table porte-pièce.	Machine à raboter.	Mobile. Mouvement d'avance rectiligne.	Mobile. Mouvement de coupe rectiligne.

	2e	Réelle. Matérialisée par l'outil de forme : pelle, à saigner, couteau.	Axe de la broche porte-pièce.	Tour.	Fixe.	Mobile. Mouvement de coupe circulaire.
	2e	Réelle. Matérialisée par l'outil de forme : pelle, à saigner, lame.	Axe de la broche porte-outil.	Machine à percer. Machine à aléser.	Mobile. Mouvement de coupe circulaire.	Fixe.
	2e	Fictive. Assurée par les glissières du chariot porte-outil. Outil d'enveloppe à charioter ou à dresser.	Axe de la broche porte-pièce.	Tour.	Mobile. Mouvement d'avance rectiligne.	Mobile. Mouvement de coupe circulaire.
	2e	Fictive. Assurée par les glissières du chariot porte-outil. Outil d'enveloppe à charioter ou à dresser.	Axe de la broche porte-outil.	Aléseuse-surfaceuse. Appareil à surfacer monté sur fraiseuse-perceuse ou machine à pointer.	Mobile. 1 mouvement de coupe circulaire. 1 mouvement d'avance rectiligne.	Fixe.
	3e	Fictive. Trajectoire circulaire d'outils d'enveloppe. Fraises pour fraisage de face. Meule boisseau.	Δ est l'axe de rotation de l'outil. D est matérialisé par glissières de la table porte-pièce.	Fraiseuse. Machine à rectifier plane à meule boisseau.	Mobile. Mouvement de coupe circulaire.	Mobile. Mouvement d'avance rectiligne.
	4e	Fictive. Trajectoire circulaire d'outils d'enveloppe. Fraises pour fraisage de face Meule boisseau.	Δ est l'axe de rotation de l'outil. D est matérialisé par l'axe de rotation de la table porte-pièce.	Machine à fraiser. Verticale à plateau circulaire. Machine à rectifier plane à table circulaire.	Mobile. Mouvement de coupe circulaire.	Mobile. Mouvement d'avance circulaire.

CLASSIFICATION DES MACHINES SELON LES PROCÉDÉS D'USINAGE DU PLAN

Voir le tableau pages 34 *et* 35.

CHOIX DU PROCÉDÉ DE TRAVAIL

Les différents procédés d'usinage du plan peuvent être groupés en deux catégories : ceux qui utilisent l'outil d'enveloppe et ceux qui utilisent l'outil de forme.

• Emploi de l'outil d'enveloppe.

La génératrice est produite par le déplacement de l'outil : déplacement rectiligne ou circulaire.

La directrice Δ est toujours rectiligne.

Le déplacement de la directrice, quand il est nécessaire (3e et 4e méthodes de génération), est rectiligne ou circulaire.

La précision d'exécution du plan dépend :

a) **de la précision de réalisation de la génératrice.** Il importe donc d'assurer un déplacement, rectiligne ou circulaire, de l'outil, aussi parfait que possible.

Les guides de ce mouvement (glissières de déplacement du porte-outil ou du porte-pièce, paliers et butées de la broche porte-outil) doivent être de construction soignée, entretenus avec soin, et munis de dispositifs de rattrapage de jeu ;

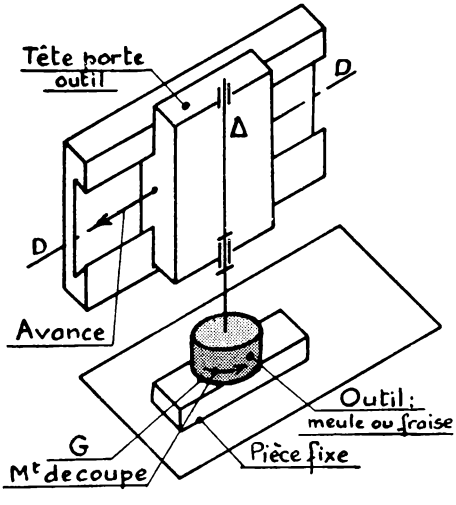


Fig. 9. — Exécution d'un plan : l'outil est animé d'un mouvement de coupe circulaire et d'un mouvement d'avance rectiligne.

b) **de la rectitude de la directrice** Δ. La directrice Δ est matérialisée par les glissières du porte-pièce ou du porte-outil, ou par les paliers de la broche porte-outil.

Les conclusions précédentes relatives à la fabrication et à l'entretien de ces organes s'appliquent intégralement ;

c) **de la position relative de la génératrice et de la directrice.** La perpendiculaire entre la directrice et le plan contenant la génératrice circulaire, doit être particulièrement soignée ;

d) **de la précision du déplacement de la directrice** Δ (*fig.* 9, 10, 11).

Le mouvement prévu doit assurer le déplacement de la génératrice circulaire G dans son plan par une translation rectiligne (*fig.* 9 et 10) ou une rotation (*fig.* 11).

Les guides de ce mouvement doivent assurer le déplacement relatif de la pièce par rapport à l'outil dans un plan parallèle à G.

La réalisation pratique conduit à exécuter des glissières rectilignes D orthogonales à l'axe Δ (*fig.* 9 et 10), ou un axe de rotation parallèle à Δ (*fig.* 11), avec, dans les deux cas, des butées axiales.

Etat de surface.

L'état de surface obtenu dépend des conditions de coupe : angles caractéristiques,

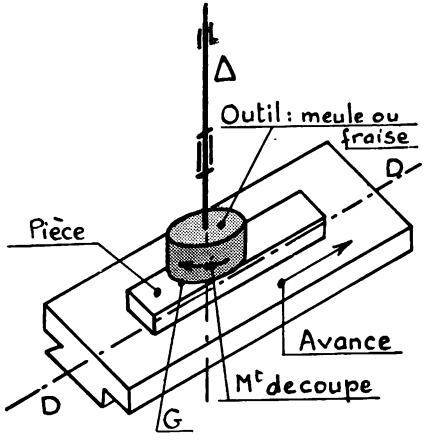


Fig. 10. — Exécution d'un plan : l'outil est animé du mouvement de coupe circulaire et la pièce du mouvement d'avance rectiligne.

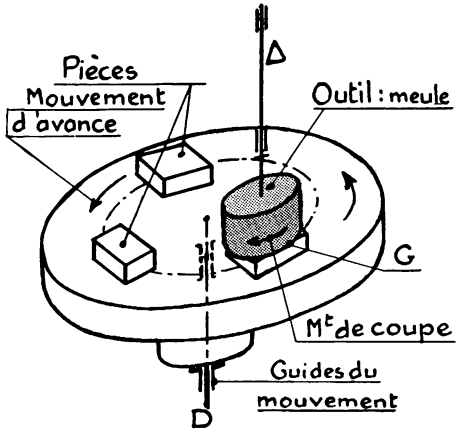


Fig. 11. — Exécution d'un plan : l'outil est animé d'un mouvement de coupe circulaire et la pièce d'un mouvement d'avance circulaire.

forme des outils, finesse de l'affûtage, choix judicieux de la vitesse de coupe, lubrification, et dimensions du copeau : avance et profondeur de coupe.

M. Androuin, reprenant les études de Taylor pour les compléter, est arrivé aux conclusions suivantes pour les travaux de finition des surfaces planes :

— pour des surfaces qui doivent avoir un bon aspect et rester brutes d'outil, choisir une grande avance et utiliser un outil ayant un grand arrondi ;

— pour des travaux de précision, quand une opération de grattage se révèle indispensable, prendre un outil de faible rayon et de faible avance. Le rayon de l'outil est pris égal à 4 fois l'avance ;

— pour tous les outils de finition, rappelons que l'angle de direction doit être faible : $C < 30^{o}$.

● Emploi de l'outil de forme.

L'outil a généralement la largeur du plan usiné. La précision du plan dans le sens de la longueur ne dépend que de celle des guidages de la machine.

Pour que le plan soit précis, l'outil doit être parfaitement rectiligne, c'est une question d'affûtage ; les guidages de la machine à affûter doivent être excellents (affûtage de fraises...) L'outil de forme le plus employé est la fraise rouleau ou fraise à une taille.

Les outils de rabotage ou de tournage ne servent guère que pour exécuter des rainures dont le fond n'exige pas une grande précision (*fig.* 12 *a* et 12 *b*).

Etat de surface.

L'état de surface peut être étudié suivant deux directions orthogonales : l'une suivant la génératrice rectiligne, c'est-à-dire dans le sens largeur de la pièce, et l'autre suivant la directrice rectiligne, c'est-à-dire dans le sens de la longueur. La rectitude de la pièce en largeur dépend de la finesse de la meule d'affûtage et de la qualité de la machine à affûter.

Une érosion locale de l'arête tranchante provoque des rayures.

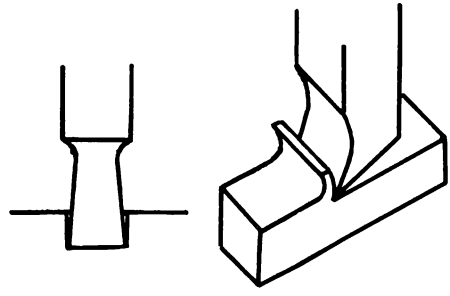


Fig. 12 *a* et 12 *b*. — Exécution d'un plan à l'outil de forme par rabotage.

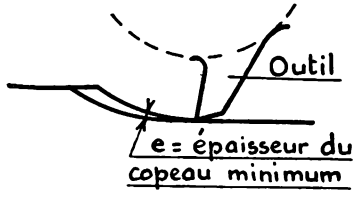


Fig. 13. — Exécution d'un plan à la fraise rouleau.

La rectitude de la pièce dans le sens longitudinal dépend de l'état des glissières guidant le déplacement du support d'outil ou du support de pièce.

Dans le cas du fraisage de forme (*fig.* 13), la surface usinée comporte des ondulations dont l'importance dépend de l'avance par dent et de la rigidité de l'arbre porte-fraise.

Le métal est fortement écroui, en raison de la faible épaisseur à tailler proposée à l'action de chaque dent au début de sa période active ; l'action du grattoir devient difficile.

Le fraisage de profil est surtout une opération d'ébauche.

Conclusions.

● L'outil d'enveloppe donne en général plus de précision que l'outil de forme. Il est moins coûteux, mais il exige une machine plus complexe, et il impose un temps d'usinage relativement important.

Quand on recherche un usinage précis : exécution de glissières, plan de joint, l'outil d'enveloppe donne des résultats satisfaisants.

- L'outil de forme est souvent fragile et, étant donné sa largeur parfois importante, il supporte généralement un effort de coupe élevé, surtout si on l'utilise pour l'ébauche.

  Il faut donc l'employer sur des machines puissantes.

  Le broutement de l'outil est à craindre ; aussi est-il préférable de prendre des copeaux minces avec une vitesse de coupe élevée. L'angle de pente d'affûtage doit avoir une valeur maximum compatible évidemment avec la dureté de la matière à tailler.

  L'outil de forme est indispensable pour l'exécution de certains travaux : rainures de clavettes, par exemple.

  Il est souvent utilisé en usinage combiné, en raison de sa grande productivité : trains de fraises à une taille utilisées en demi finition seulement, la finition étant obtenue par fraisage de face ou par rectification.

  Le seul outil de forme susceptible de donner une grande précision est la broche, qui, nous le verrons plus loin, est constituée de plusieurs outils successifs ne taillant que des copeaux de faible épaisseur.

Les différents procédés d'usinage du plan

I. — LE RABOTAGE

PRINCIPE DE L'USINAGE

Les machines à raboter : étaux-limeurs, pour les petites pièces, et raboteuses, pour les pièces importantes, sont conçues pour permettre l'emploi d'un outil d'enveloppe.

Le mouvement de coupe est un mouvement rectiligne *c*, parallèle à la directrice Δ du plan, et le mouvement d'avance *a* est parallèle à la génératrice G du plan *(fig.* 14*)*.

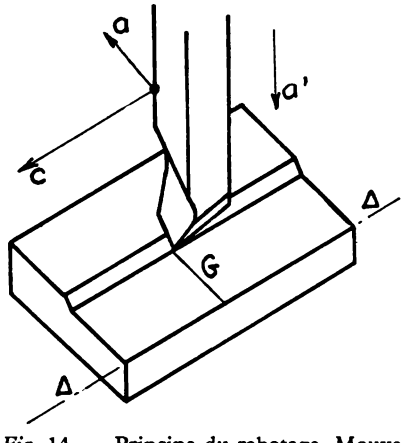


Fig. 14. — Principe du rabotage. Mouvement de coupe *c* et d'avance *a* communiqué à l'outil.

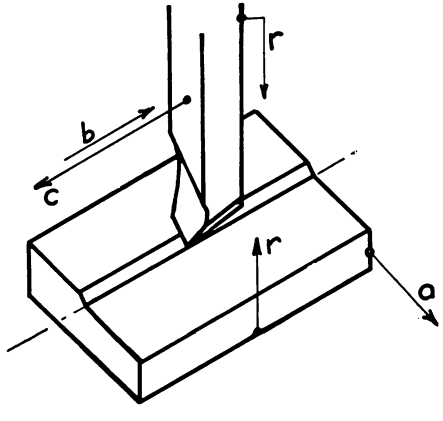


Fig. 15. — Principe du rabotage. Système mixte : l'étau limeur, le mouvement de coupe *c* communiqué à l'outil, le mouvement d'avance *a* est communiqué à la pièce ; le réglage *r* est obtenu par déplacement de l'outil ou de la pièce.

Le mouvement d'avance peut également se produire suivant une direction verticale *a'*, s'il s'agit d'obtenir un plan vertical.

Les mouvements *c* et *a* sont des mouvements relatifs. Sur la figure 14, nous avons supposé la pièce fixe et l'outil mobile. Des solutions mixtes ont été adoptées.

Étaux-limeurs.

L'outil est animé du mouvement de coupe *(fig. 15 et 16)*. La pièce reçoit le mouvement d'avance. Le réglage de la position de la pièce par rapport à l'outil se dégrossit en agissant

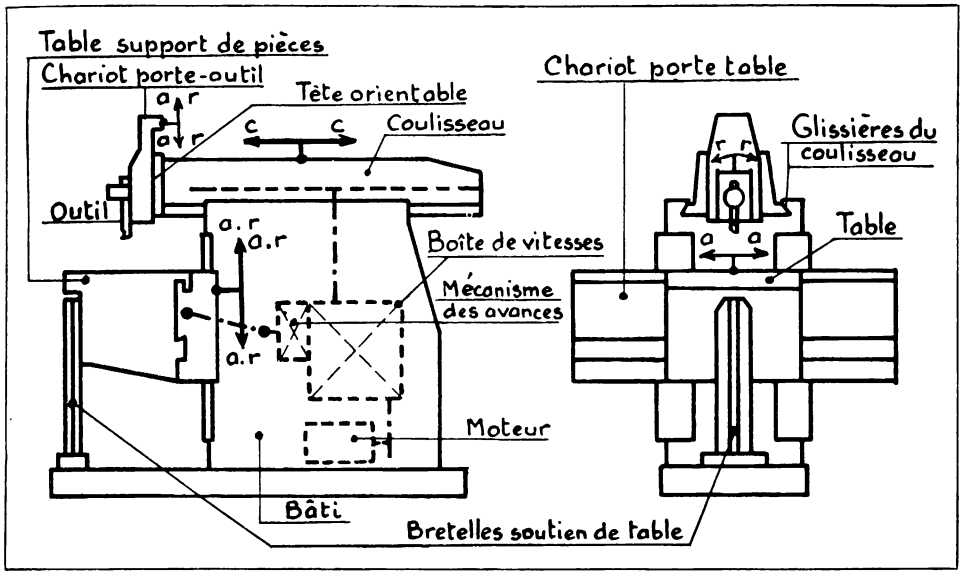


Fig. 16. — Etau limeur : *c* mouvement de coupe, *a* mouvement d'avance, *r* réglage.

sur la table support de pièce suivant *r*, et se termine en agissant sur l'outil suivant *r'*.

Un mouvement *b*, opposé à *c*, est indispensable pour ramener l'outil à sa position de départ.

Une telle affectation des différents mouvements ne trouve une justification qu'en raison des faibles courses imposées à l'outil, et du poids peu important des pièces.

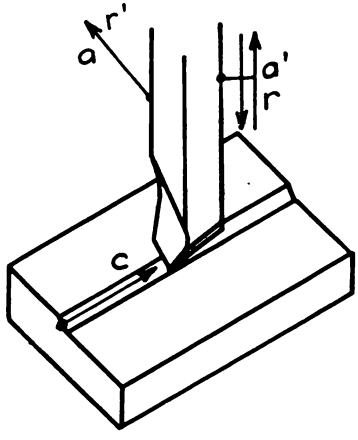


Fig. 17. — Principe du rabotage ; système mixte : la raboteuse. Mouvement de coupe *c* communiqué à la pièce, mouvement d'avance *a* et *a'* communiqué à l'outil. Le réglage *r* est obtenu par déplacement de l'outil.

Raboteuses.

Elles sont conçues pour l'usinage des pièces lourdes et de grandes dimensions. L'examen d'une machine à raboter montre que, seul, le mouvement de coupe est

communiqué à la table support de pièce, les autres mouvements étant donnés à l'outil : *fig.* 17, 18 et 19.

A première vue, il semblerait que tous les mouvements devraient être communiqués à l'organe en apparence le plus léger : le support d'outil. En réalité, en raison des

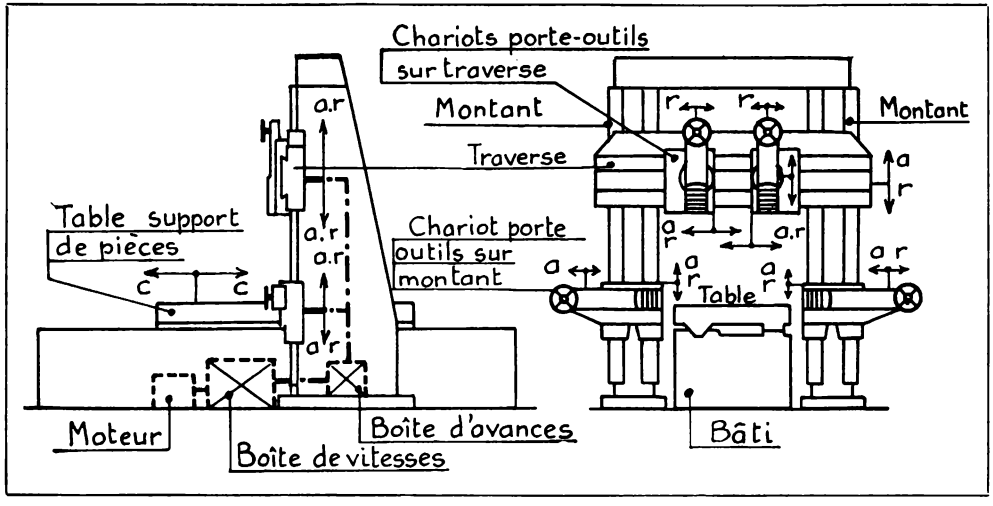


Fig. 18. — Raboteuse à deux montants.

grandes dimensions (largeur et hauteur) des pièces à usiner, l'ensemble support d'outil doit avoir une forme en portique, ou en console, dont la rigidité ne peut être assurée qu'au prix d'une masse de métal importante, souvent supérieure à celle de la table et de la pièce.

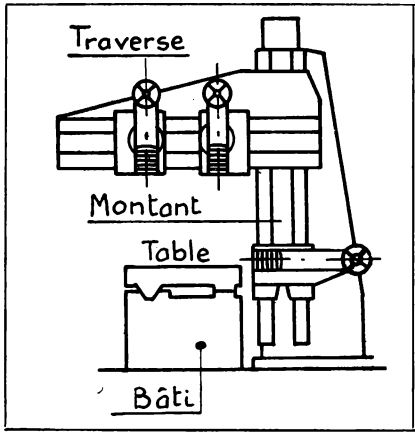


Fig. 19 — Raboteuse à un seul montant.

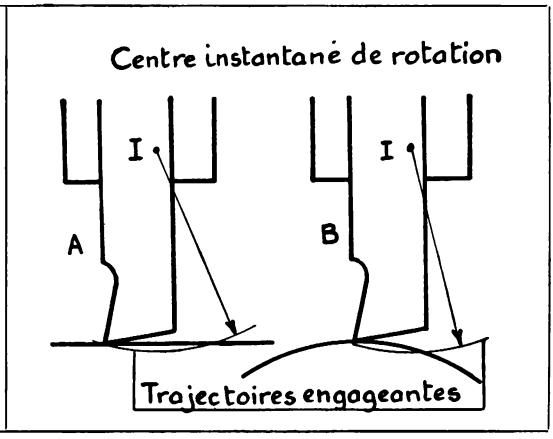


Fig. 20. — Comparaison entre les trajectoires engageantes des outils de rabotage et de tournage.

Étude de l'outil.

L'outil doit être particulièrement robuste. Il doit non seulement résister avec le moins de flexion possible aux efforts de coupe importants, mais aussi au choc qui se produit au début de chaque passe.

L'outil d'ébauche doit avoir un arrondi de pointe dont le rayon soit égal ou supérieur à quatre fois l'avance.

Pour la finition, on réserve une surépaisseur de métal à enlever égale à la moitié de l'avance prise pour l'ébauche, et une avance égale à la profondeur de passe. Le rayon de pointe est grand : environ 8 mm.

Comme la surface de la pièce est plane, la tendance à l'engagement de l'outil est plus grande que dans le cas du tournage (voir *fig.* 20).

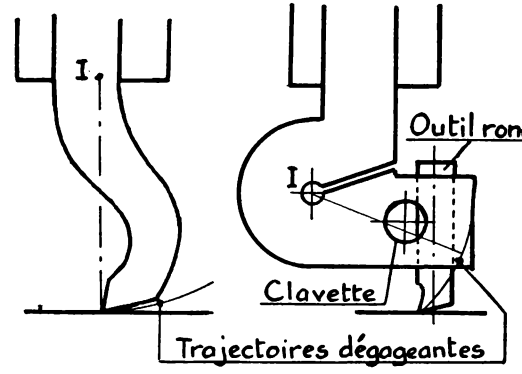


Fig. 21. — Outil forgé à trajectoire dégageante.

Fig. 21 *bis.* — Porte-outil à trajectoire dégageante.

On est conduit, pour rendre la trajectoire dégageante, à forger les outils, afin de rejeter en arrière l'arête tranchante, ou, ce qui est encore mieux, à utiliser des porte-outils élastiques dits « compensés » (*fig.* 21 et 21 *bis*).

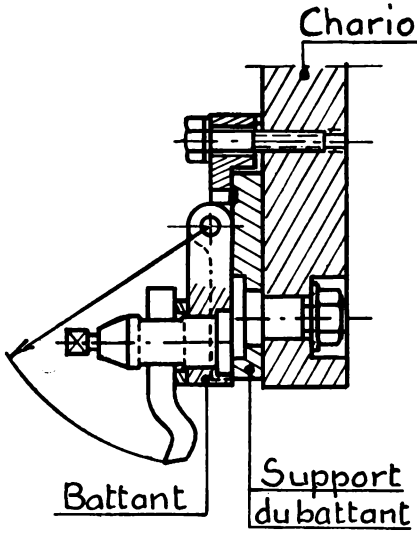


Fig. 22. — Support d'outil de raboteuse : détail du battant inclinable.

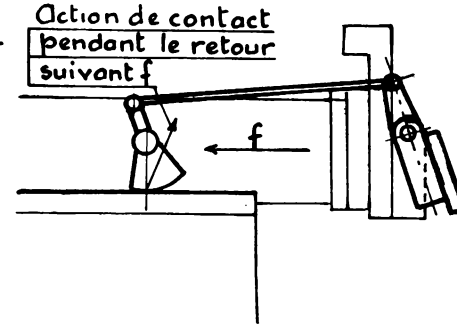


Fig. 23. — Commande mécanique du battant d'un porte-outil sur un étau limeur.

Le porte-outil articulé.

En raison de sa flexion, même légère, pendant le travail, l'outil frotte sur la pièce pendant la course de retour : il s'userait si on ne lui permettait pas de

se soulever sous l'action de la force de frottement (*fig.* 22), ou au moyen d'un dispositif commandé mécaniquement (voir *fig.* 23).

Principaux outils.

Ils sont identiques à ceux du tour (*fig.* 24).

Commande du mouvement de coupe.

Pour éviter toute perte de temps, après une passe, le retour de la pièce en position de travail par rapport à l'outil, se fait avec une vitesse de translation plus grande que la vitesse de coupe : c'est le retour rapide.

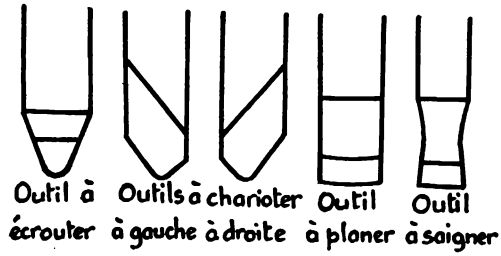


Fig. 24. — Différents outils de rabotage.

Si on désigne par V_r la vitesse de retour et V_c la vitesse de coupe le rapport V_r/V_c doit être aussi grand que possible.

Lorsque la commande est mécanique, ce rapport ne peut guère dépasser 2, en raison des effets d'inertie à absorber en fin de course à chaque changement de sens. L'outil ne travaille théoriquement que pendant les 2/3 du temps de fonctionnement de la machine.

Les dispositifs de commande hydraulique ou électrique par moteur à courant continu à vitesse variable : Système Ward Léonard, système électronique (voir « Etude fonctionnelle des machines outils »), permettent de porter le rapport V_r/V_c à 4 ou 5. Sur les grosses raboteuses modernes, on a supprimé toute perte de temps en utilisant deux ou quatre outils, la moitié travaillant dans un sens, et l'autre moitié dans l'autre. Dans ce cas, la vitesse aller est égale à la vitesse retour (*fig.* 25).

Sur les raboteuses, le mouvement de chacune des courses aller ou retour comprend trois périodes :

— période de mouvement accéléré,
— période de mouvement uniforme,
— période de mouvement retardé.

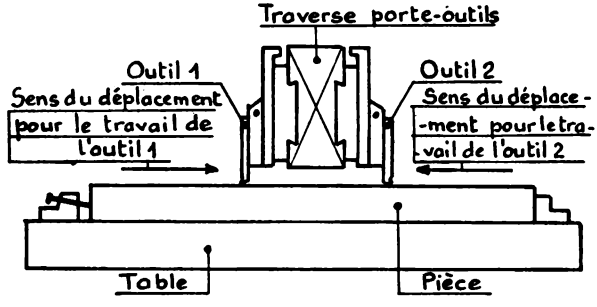


Fig. 25. — Raboteuse à deux sens de coupe.

La première et la dernière sont très courtes.

Des efforts d'inertie, $F = m\gamma$, prennent naissance sur les organes en mouvement, table et pièce.

Nous donnons ci-dessous la représentation graphique du mouvement de l'outil sur raboteuse, pour une course aller et retour (*fig.* 26).

Sur l'étau-limeur à bielle intérieure, la vitesse s'annule à chaque fin de course, comme sur la raboteuse, mais elle varie pendant toute la course (*fig.* 27).

Il existe des efforts d'inertie en permanence sur le coulisseau porte-outil.

Ces efforts peuvent amener des déformations et des vibrations nuisibles à la précision de la machine. La valeur maximum de l'accélération peut atteindre, pour des machines rapides, une fois et demie à deux fois l'accélération due à la pesanteur.

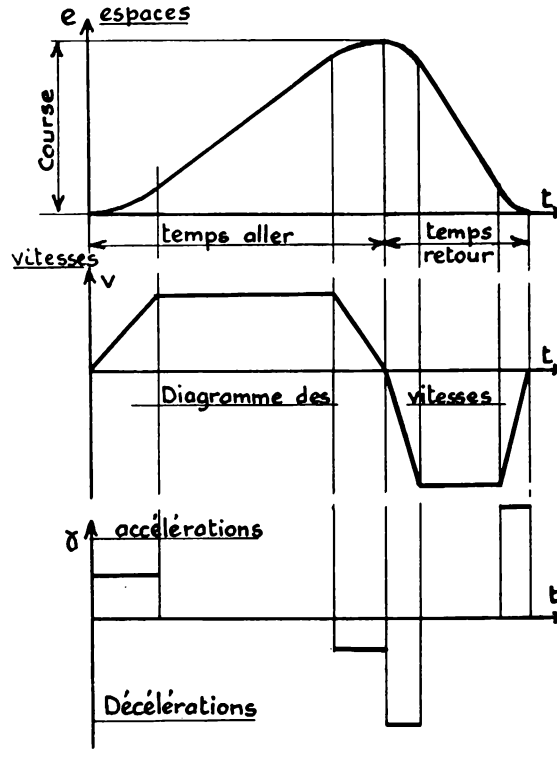


Fig. 26. — Diagramme des espaces, vitesses et accélérations du mouvement de la table d'une raboteuse.

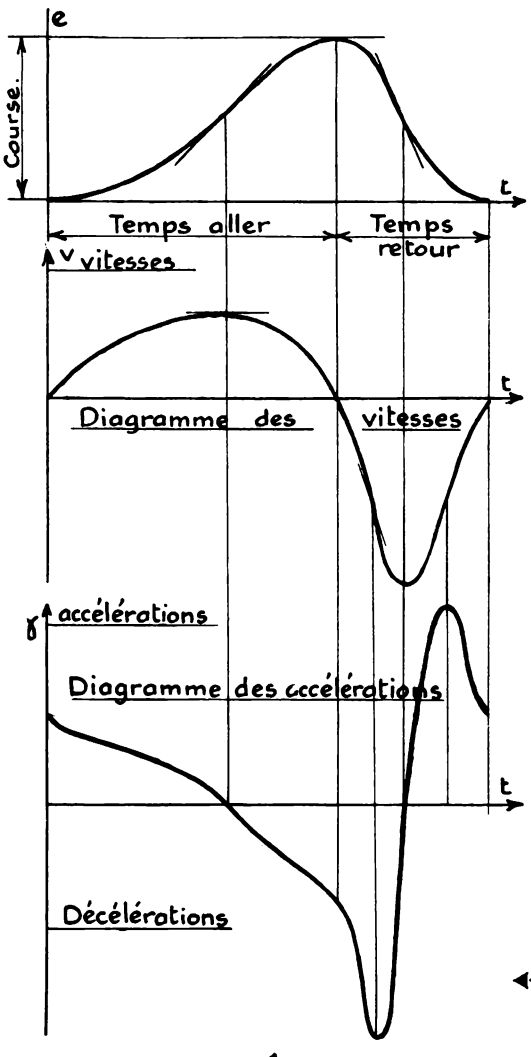
Précision comparée de la raboteuse et de l'étau-limeur.

La raboteuse est plus précise que l'étau-limeur en raison même de sa conception :

- — table bien assise, longs guidages, pas de porte à faux ;
- — outil supporté par un ensemble rigide, généralement en arcade.
- — pas de porte à faux variable pendant le travail ;
- — dispersion plus facile des calories produites par le frottement des glissières, en raison de la masse de fonte importante.

Dans l'étau-limeur, le coulisseau s'échauffe et tend à se déformer ; les parties frottantes se dilatent et, comme la partie supérieure reste à température plus basse, le coulisseau prend la forme d'un arc (surtout sur les étaux à grandes vitesses).

La surface obtenue sera creuse dans le sens de la longueur ; le défaut est très net pour les grandes courses (voir *fig.* 28).



M. Y. Renard, directeur des usines G.S.P. a fait breveter la section de coulisseau représentée par la *figure* 29 :

> Le plan moyen de la glissière est tel que les moments d'inertie par rapport à XY sont les mêmes pour les deux parties supérieure et inférieure.
>
> Dans ces conditions, l'allongement des glissières situées sur la fibre neutre du coulisseau n'en altère pas la forme (moins de quelques centièmes de millimètre pour un étau-limeur de 600 mm).

Il n'en demeure pas moins que la machine à raboter est plus précise que l'étau-limeur : si la tolérance est de l'ordre de 0,02 mm pour une pièce rabotée, elle sera d'environ 0,04 mm si on l'usine sur un étau-limeur.

Sur une grosse raboteuse pesant 40 t, G.S.P. garantit moins de 0,03 mm par mètre. Sur les machines à raboter et les étaux-limeurs, on peut toujours usiner la table au moyen de l'outil : toute garantie de précision de position du porte-pièce est ainsi assurée.

Fig. 27. — Diagrammes des espaces, vitesses et accélérations du coulisseau d'un étau limeur.

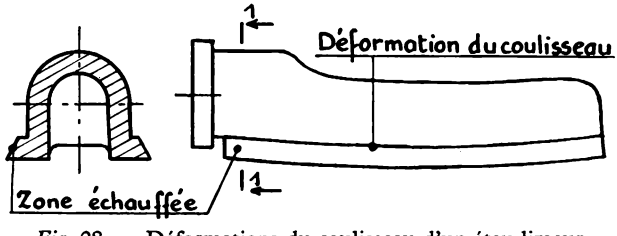


Fig. 28. — Déformations du coulisseau d'un étau limeur sous l'action de la chaleur.

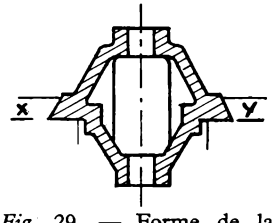


Fig. 29. — Forme de la section du coulisseau de l'étau limeur G.S.P.

PRATIQUE DU RABOTAGE

Vitesse de coupe.

Sur les machines anciennes, les vitesses possibles étaient peu nombreuses : 2 ou 3. La vitesse maximum était de 15 m/mn environ.

Sur les machines actuelles, prévues pour l'utilisation des outils en carbure, les vitesses de coupe possibles peuvent atteindre 70 à 80 m/mn pour les étaux-limeurs et 120 m/mn pour les raboteuses. La commande électrique, par groupe Ward Léonard ou par dispositif électronique, a permis une variation continue de la vitesse avec une extrême souplesse.

Calcul des vitesses de coupe.

Les vitesses de coupe sont théoriquement celles du tournage. Elles pourraient même être supérieures, puisque l'outil, ne travaillant pas d'une façon permanente, peut se refroidir pendant la course de retour.

Mais l'inertie des organes en mouvement, l'attaque brutale de l'outil, conduisent à limiter la vitesse de coupe.

Sur l'étau-limeur, la vitesse varie pendant le travail ; on doit considérer une vitesse de coupe moyenne. Son expression *approchée* peut être prise égale :

$$Vm = \frac{2\,C}{T} \qquad (1)$$

C : course de l'outil,

T : temps pour un aller et retour de l'outil, est la période. On en déduit : $\frac{1}{T} = N$, nombre de coups d'outil par minute.

En portant cette valeur de T dans (1) on a

$$Vm = 2\,CN$$

ce qui est bien le chemin parcouru par l'outil en 1 mn.

Il est évident que la vitesse maximum est atteinte par l'outil en travail quand il est à mi-course ; cette vitesse ne doit pas atteindre la vitesse limite définie par le Commandant Denis. Pratiquement, dit M. Y. Renard, on peut adopter pour vitesse moyenne la vitesse économique de coupe : $V_m = V_e$.

M. Androuin considère, pour l'étau-limeur, une vitesse fictive égale à la moitié de la vitesse de coupe avec laquelle on effectuerait la même passe au tour. On en déduit le *nombre de coups par minute.*

Pour la raboteuse, M. Androuin considère une course fictive de la machine C_f : celle qui serait parcourue, à l'aller ou au retour, à vitesse constante (*fig.* 30).

Dans ces conditions, la vitesse aller serait :

$$V_A = \frac{C_f}{t_A}$$

On introduit ainsi la notion de *course additionnelle* $C_a = C_f - C_r$ qui, pour chaque régime de vitesse de la table, devient une caractéristique de la machine, déterminée expérimentalement. Connaissant C_a et C_r, on peut calculer $C_f = C_a + C_r$ puis déterminer la vitesse $V_a = \frac{C_f}{t_A}$ qui doit être égale à la vitesse économique.

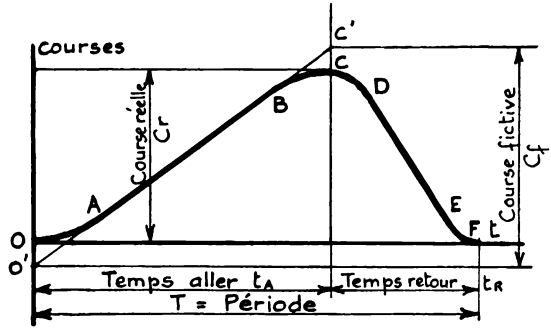


Fig. 30. — Diagramme de M. Androuin pour le calcul des vitesses de coupe.

Avances.

En ébauche, elles peuvent atteindre 10.

En finition, on descend jusqu'à 0,2 mm par coup.

En planage : 20 à 30 mm.

Profondeur de passe.

Elle est limitée par la résistance de l'outil, par la déformabilité de la pièce, et par l'importance de l'ablocage. Il faut donc toujours vérifier que la puissance de la machine est suffisante :

Puissance de coupe : P = FV en W (watts),

F : effort de coupe en Newton,

V : vitesse de coupe en m/s.

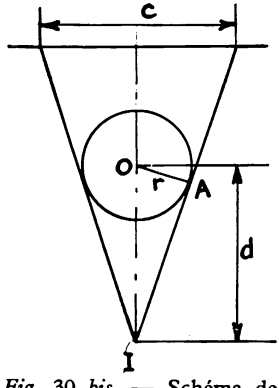


Fig. 30 *bis.* — Schéma de fonctionnement de la bielle intérieure d'un étau limeur.

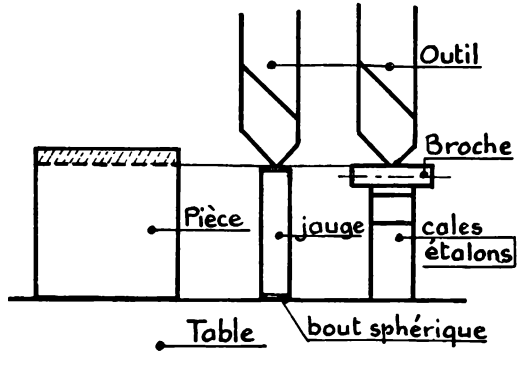


Fig. 31. — Réglage de la position de l'outil d'étau limeur.

Réglage des outils

On règle la pointe de l'outil par rapport à la table, ou au plan de référence de la pièce. On intercale entre la table et l'outil une jauge de longueur connue, une jauge micrométrique, des cales étalons (*fig.* 31).

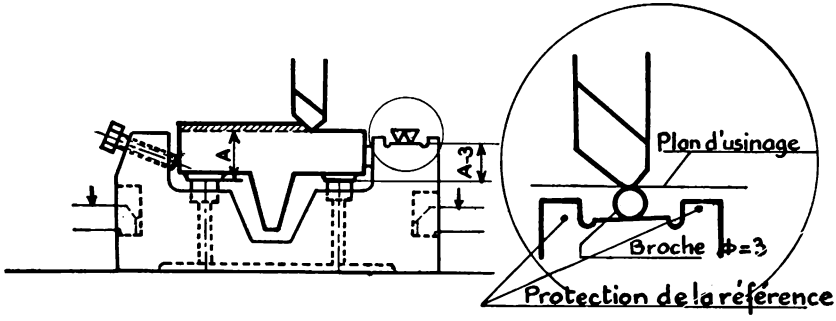


Fig. 32. — Réglage de l'outil d'étau limeur pour pièce sur montage.

Quand on utilise des cales de précision, on doit interposer entre l'outil et le calage une petite broche de diamètre 3 (en acier Stubs, par exemple).

Enfin, si l'on utilise un porte-pièce spécial, on prévoira un dispositif de réglage solidaire (voir *fig.* 32).

Pour le rabotage de série, on peut fixer à l'extrémité de la table un gabarit de forme sur lequel on vient régler la position des outils (voir *fig.* 33).

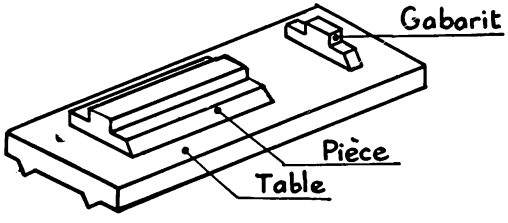


Fig. 33. — Utilisation d'un gabarit pour rabotage en série.

EXÉCUTION DE SURFACES PLANES ASSOCIÉES

Plans parallèles

Il n'y a pas de difficulté, chaque fois qu'une première face de référence a été dressée, on peut faire reposer la pièce directement sur la table de la machine (*fig.* 34).

Si les faces de référence ne peuvent entrer en contact avec la table, il suffit d'en régler le parallélisme avant bridage.

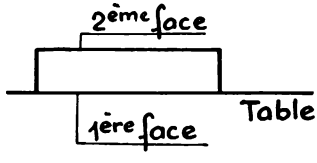


Fig. 34. — Exécution de faces parallèles. Première face usinée reposant sur la table.

Ainsi, pour raboter la partie supérieure 2 (voir *fig.* 35) après l'usinage, en une première opération, des faces de référence 1, on règle le parallélisme de ces petites faces avec la table, en se servant de vérins, et en contrôlant au comparateur et à l'aide d'une règle.

Le comparateur est monté sur socle, le socle repose sur la table.

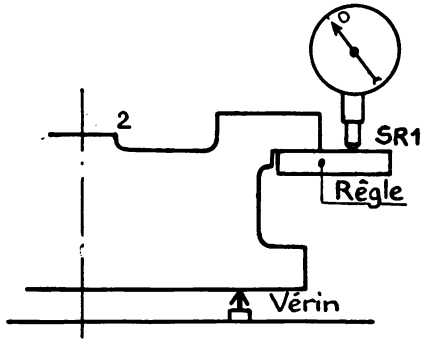


Fig. 35. — Réglage de la position d'une pièce pour usinage de faces parallèles.

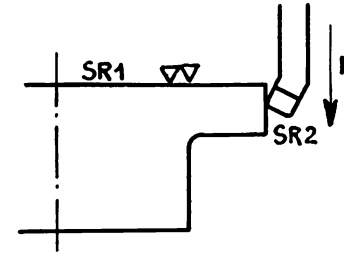


Fig. 36. — Exécution de faces perpendiculaires.

Plans perpendiculaires.

Premier cas :

La face SR1 est petite par rapport à SR2 (*fig.* 36).

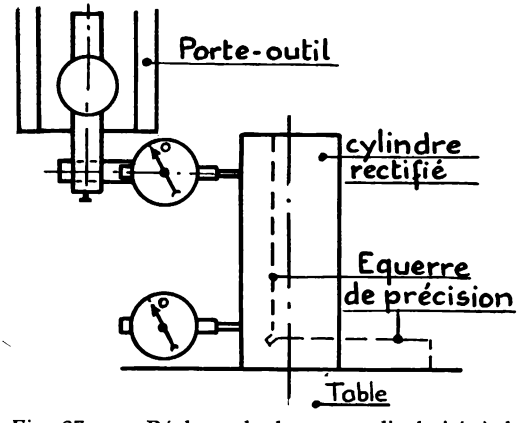


Fig. 37. — Réglage de la perpendicularité à la table du mouvement du chariot porte-outil d'une raboteuse.

On utilise le mouvement vertical du porte-outil (sens F). Ce mouvement est toujours de faible amplitude ; la hauteur à usiner doit être inférieure au déplacement possible du chariot porte-outil.

— Réglage de l'outil.

Le chariot porte-outil étant orientable, on ne peut se fier à la seule lecture du zéro. Il faut s'assurer que l'outil descend bien perpendiculairement à la table. On monte un comparateur sur le chariot porte-outil (ou sur l'outil), et on palpe une équerre appuyée sur la table, ou un cylindre rectifié (voir *fig.* 37).

Deuxième cas :

La face 2 est importante. Il faut faire tourner la pièce de 90°. On applique la face 1 contre une ou plusieurs équerres précises (*fig.* 38).

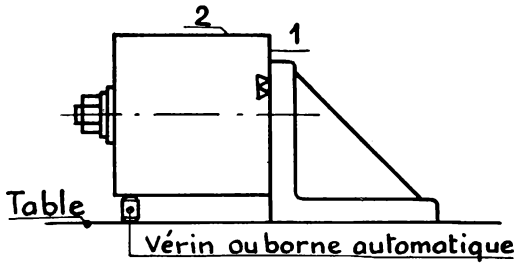


Fig. 38. — Montage d'une pièce sur équerre pour usinage de faces perpendiculaires.

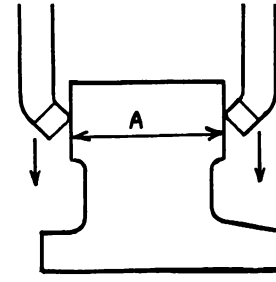


Fig. 39. — Exécution de faces parallèles en utilisant les outils montés sur deux porte-outils.

Plans parallèles et perpendiculaires à la table.

On peut exécuter, sans démonter la pièce, l'un des plans avec un outil à droite, et l'autre avec un outil à gauche. On peut aussi utiliser les deux porte-outils réglés pour la cote A, et travaillant simultanément (*fig.* 39).

S'il était nécessaire d'usiner la face B parallèlement à la face A, après un démontage de la pièce (par exemple si la face A est sur une rainure fermée à ses deux extrémités et, de ce fait, ne peut être rabotée), on monterait un comparateur sur le porte-outil, et on réglerait la pièce sur la table jusqu'à ce que son déplacement sur la longueur de la course laisse l'aiguille du comparateur à zéro (voir *fig.* 40).

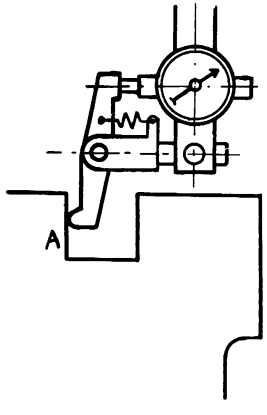
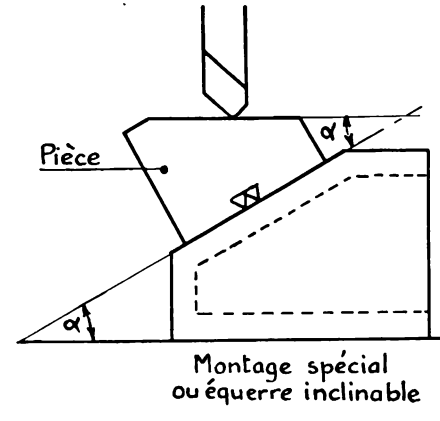


Fig. 40. — Exécution d'une rainure parallèle à une face déjà usinée : réglage de l'outil par rapport à la pièce. ←

Fig. 41. — Montage d'une pièce pour usinage de face oblique. →



Plans formant des dièdres quelconques.

La face de départ étant exécutée, pour usiner la deuxième, on monte la pièce sur une équerre inclinable, ou sur un montage spécial (*fig.* 41). Aucun réglage de l'outil n'est à prévoir, puisqu'il travaille parallèlement à la table.

On peut aussi incliner le porte-outil. Le réglage du porte-outil se fait avec un comparateur, par rapport à un gabarit d'angle, une fausse équerre de précision, ou une barre sinus (voir *fig.* 42 *et* 43)

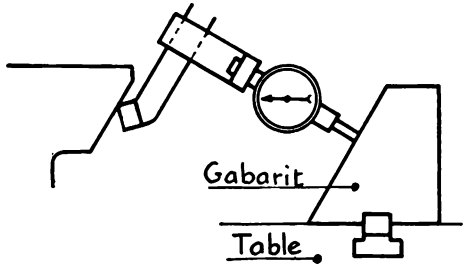


Fig. 43. — Réglage précis du déplacement oblique d'un outil au moyen d'un gabarit et d'un comparateur.

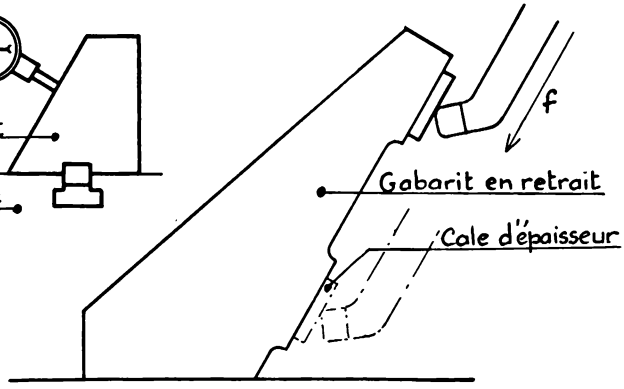


Fig. 42. — Réglage du déplacement oblique de l'outil en utilisant un gabarit.

Prismes polyédriques réguliers.

L'exécution de pièces importantes de cette forme se fait rarement sur la raboteuse. Sur un étau-limeur de course suffisante, la pièce peut être montée entre pointes sur un diviseur ; on ébauche toutes les faces d'abord (répartition des déformations).

Travaux exécutés d'après gabarit.

Pour réduire la durée des réglages d'outils dans les travaux en série, on emploie souvent un « gabarit en retrait » de la pièce à usiner. L'exemple classique est celui des queues d'hironde de chariots et glissières (*fig.* 44). Le gabarit reproduit le contour de la

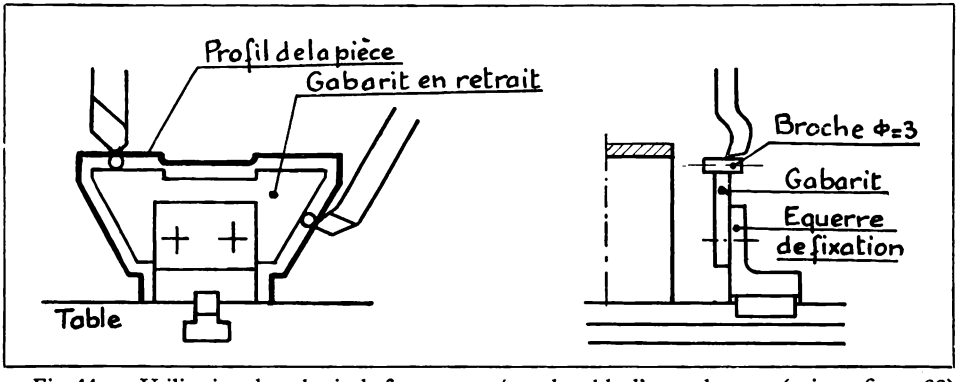


Fig. 44. — Utilisation du gabarit de forme monté sur la table d'une raboteuse (suivant figure 33) pour le réglage des outils.

pièce à usiner, mais il est en retrait de 3 à 5 mm. On le monte sur une équerre à l'avant de la pièce, équerre centrée sur la table par une clavette de position. La broche de réglage évite tout contact direct entre l'outil et le gabarit. Le retrait met le gabarit à l'abri de l'outil au cours du travail. La largeur du gabarit doit être assez grande pour permettre l'arrêt de l'outil facilement en face de lui.

Remarque importante.

La tête porte-outil comporte un dispositif particulier prévu pour les rabotages obliques ou verticaux : il permet de faire tourner légèrement l'outil ; une inclinaison de 5° suffit.

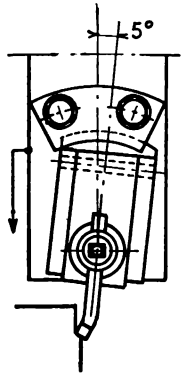


Fig. 45. — Inclinaison du support de battant porte-outil pour usinage de face ◀— verticale.

La *figure* 45 montre clairement que l'outil, en se relevant, se dégage et ne frotte pas sur toute la largeur de la face.

Pour prendre de fortes passes en profondeur on inclinera légèrement aussi le volet porte-outil, même dans le cas de l'usinage d'une face parallèle à la table (*fig.* 46).

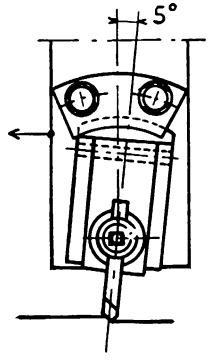


Fig. 46. — Inclinaison du support de battant porte-outil pour usinage de faces parallèles à fortes passes. —▶

Contrôle du travail

On emploie les moyens classiques de contrôle des surfaces rabotées :

— règle de précision,
— marbre portatif,
— comparateur sur pied,
— niveau de précision.

LE MORTAISAGE

Le mortaisage permet le rabotage des plans ; l'outil trace la génératrice et le chariot porte-pièce la directrice. Le résultat dépend de la précision des guidages du coulisseau porte-outil et de la table.

La mortaiseuse est un étau-limeur dont le coulisseau porte-outil se déplace verticalement (voir *fig.* 47). Sur la table, un plateau circulaire, qui peut être animé d'un mouvement de rotation à commande automatique, permet l'exécution des surfaces de révolution, des pièces polyédriques (poinçons divers).

L'outil de chariotage classique est représenté par la figure 48.

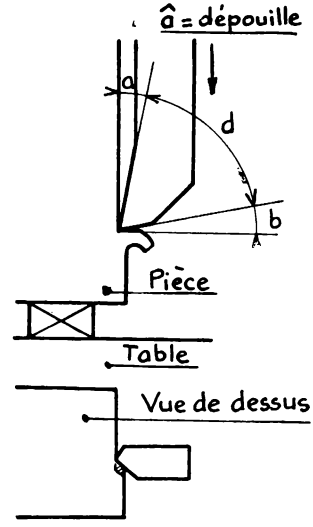


Fig. 48. — Mode d'action de l'outil de mortaisage.

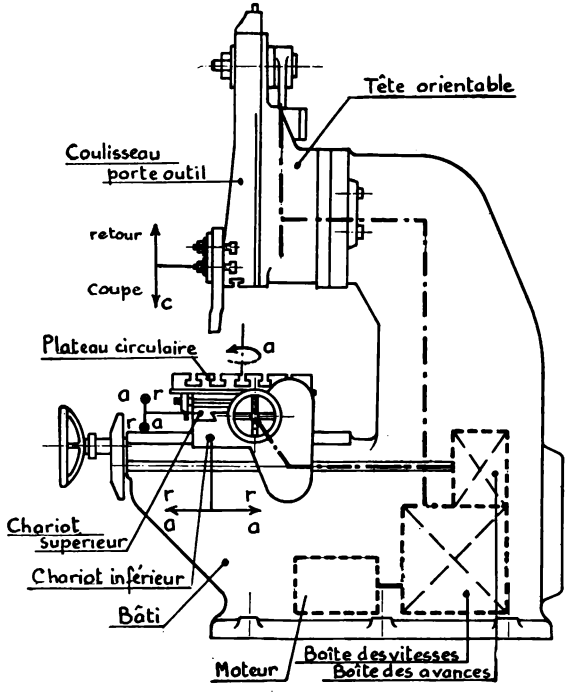


Fig. 47. — Mortaiseuse.

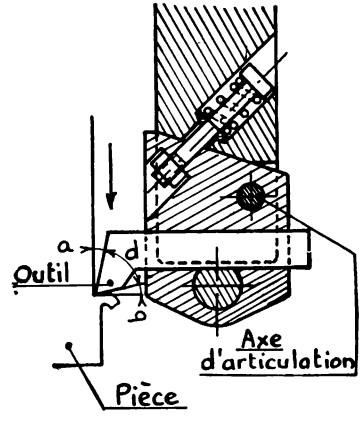


Fig. 49. — Support d'outil rapporté pour mortaisage.

Pendant la course de retour, l'outil frotte sur la pièce et s'use. Comme les machines ne sont pas pourvues de dispositif évitant ce frottement, il y a avantage à utiliser un porte-outil articulé (*fig.* 49).

2. — LE FRAISAGE

L'outil de fraisage est animé d'un mouvement de rotation.

Nous avons vu que la génération du plan peut être obtenue en utilisant :

1° Un outil dont les arêtes tranchantes engendrent en tournant un cylindre dont une génératrice est confondue avec la génératrice G du plan.

Le déplacement de la pièce est une translation suivant la directrice Δ du plan (premier mode de génération ; troisième procédé, voir tableau pages 34 et 35).

C'est le *fraisage de profil* (*fig.* 1).

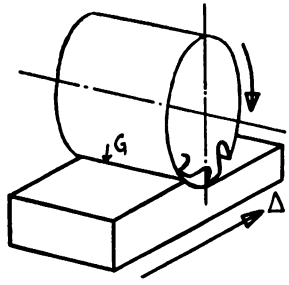


Fig. 1. — Fraisage de profil.

2° Un outil dont l'arête tranchante décrit la génératrice circulaire, tandis que le déplacement rectiligne de la pièce n'est autre que la translation D de la directrice Δ (3e mode de génération, 10e procédé).

C'est le *fraisage de face* (*fig.* 2).

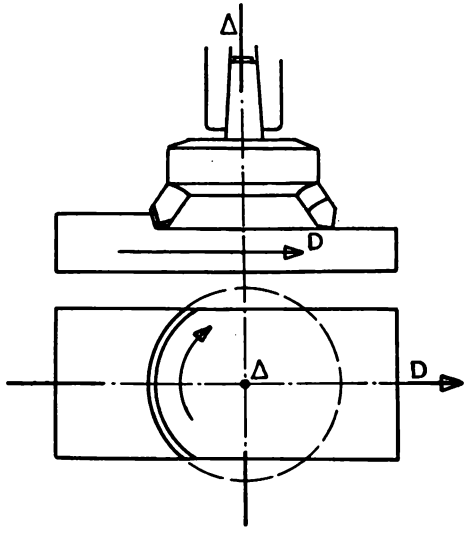


Fig. 2. — Fraisage de face.

FRAISAGE DE PROFIL

L'outil comporte des dents taillées dans un cylindre d'acier à coupe rapide :

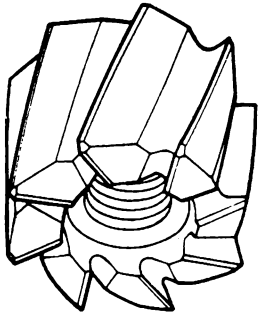


Fig. 3. — Fraise hélicoïdale à droite, 2 tailles.

— Fraises cylindriques à une ou trois tailles, à trou lisse pour être monté sur l'arbre porte-fraise d'une fraiseuse horizontale.

— Fraises à deux tailles avec entraîneur à queue conique pour fraiseuse verticale, universelle, ou, même, horizontale.

La denture est, le plus souvent, hélicoïdale (*fig.* 3) et, s'il s'agit de fraises de largeur réduite, alternée (*fig.* 4).

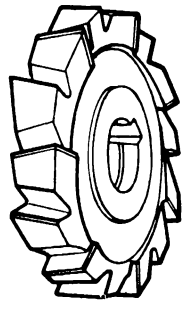


Fig. 4. — Fraise à hélices alternées.

État des surfaces usinées.

Étude expérimentale.

Nous nous proposons de comparer les surfaces obtenues avec des fraises à denture droite, hélicoïdale ou alternée.

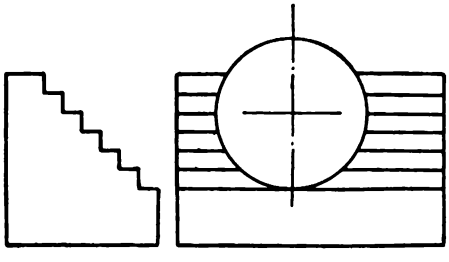


Fig. 5. — Expérimentation.

Sur une fraiseuse nous montons une pièce dont la face de référence, soigneusement usinée, est placée parallèlement à la table : contact direct, cales ou étau.

La pièce a été usinée préalablement, en forme d'escalier (*fig.* 5) pour permettre un examen facile des surfaces usinées.

Les mesures de profondeur ont été effectuées avec un micromètre pneumatique Solex spécialement équipé à cet effet.

Résultats obtenus.

1° *Influence de la denture.*

a) *Fraise à denture droite.*

Elle provoque des vibrations importantes et produit, à la surface de la pièce, des ondulations courtes et profondes d'environ : 0,05. L'examen à la loupe révèle des arrachements.

b) *Fraises à denture hélicoïdale simple ou alternée.*

La surface taillée présente des ondulations dont le pas n'est pas absolument constant. Pour une fraise à denture alternée de diamètre : 100 mm, 12 dents, en adoptant une avance de 0,1 par dent et par tour, on trouve une profondeur d'ondulation de 0,02 et un pas de 1,5 à 2 mm.

2° *Influence de l'avance.*

a) Pour la même fraise (fraise hélicoïdale $d = 100/12$ dents) le pas de l'ondulation diminue quand on diminue l'avance par dent ($a = 0{,}05$) tandis que la profondeur en augmente : 0,03.

b) Au contraire le pas s'allonge si l'avance par dent augmente ($a = 0{,}15$) et si la profondeur reste sensiblement la même.

3° *Influence de la vitesse de coupe.*

Pour une même fraise et une même avance par dent, le pas de l'ondulation ne varie pas avec la vitesse de coupe.

4° *Influence de la profondeur de passe.*

Pour une même fraise, une même avance, une même vitesse de coupe, le pas de l'ondulation ne varie pratiquement pas quand la profondeur de passe augmente.

Comparaison de la théorie et de l'expérience

Étude théorique.

Sur une fraiseuse, l'axe de la fraise est fixe et la pièce se déplace sous l'outil suivant f_1 à la vitesse d'avance (*fig.* 6). Il est évident que les résultats seraient identiques si, la pièce restant fixe, l'axe de la fraise se déplaçait parallèlement à lui-même en sens contraire suivant f et à la même vitesse.

Considérons alors la fraise dans une position telle que l'une de ses dents soit située sur la normale en A à la surface usinée. Quand la dent suivante 2 occupe une position semblable en A_1, la fraise s'est déplacée par rapport à la pièce, d'une quantité égale à l'avance par dent : $OO_1 = a$. L'arête tranchante de la dent 1 a décrit un arc de cycloïde à pas raccourci $\overset{\frown}{AD_1}$. (On a une cycloïde car la circonférence roule sur Δ ; cette cycloïde est à pas raccourci parce que, en général, $OO_1 = a < \overset{\frown}{A_0A}$.)

La dent 2 entre en contact avec le métal en C et décrit l'arc de cycloïde $\overset{\frown}{CA_1C_1D_2}$.

La troisième dent entre à son tour en contact avec le métal en C_1. La distance CC_1 est égale à l'avance par tour et par dent : a. Le profil de la surface usinée est la ligne ACA_1C_1.

Pour avoir un ordre de grandeur de la profondeur des aspérités, on peut calculer la valeur de FG qui leur est toujours supérieure.

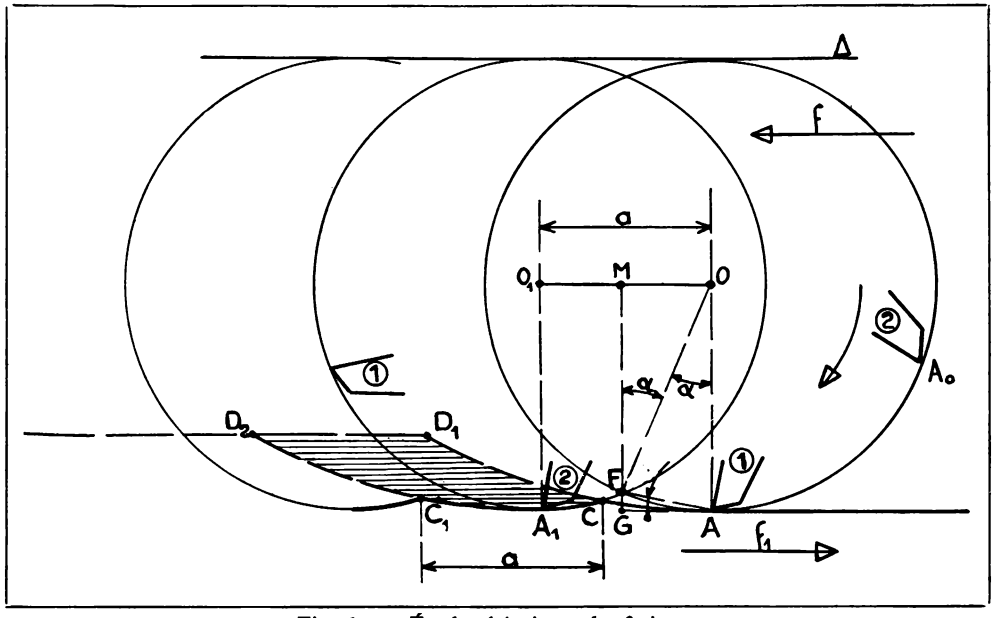


Fig. 6. — Étude théorique du fraisage.

Remarquons que $\widehat{FAG} = \frac{\widehat{FOA}}{2}$ (même mesure). On a donc :

$$FG = AG \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \qquad (1)$$

Mais :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{OM}{MF} \qquad \text{et} \qquad \sin \alpha \frac{OM}{OF} = \frac{\frac{a}{2}}{R} = \frac{a}{2R}$$

Comme α est petit, on peut remplacer la tangente par le sinus, et écrire $\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{\sin \alpha}{2}$

on a donc : $$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cong \sin \frac{\alpha}{2} \cong \frac{\sin \alpha}{2}$$

La relation (1) devient : $FG \cong AG \cdot \frac{\sin \alpha}{2} = \frac{a}{2} \cdot \frac{a}{4R}$

d'où : $$FG = \frac{a^2}{8R}$$

Calculons sa valeur dans le cas où R = 50 mm et $a = 0{,}1$:

$$FG = \frac{0{,}01}{400} = 0{,}000\ 025 \text{ soit } 0{,}025 \text{ micron.}$$

La fraise devrait donc laisser des aspérités inférieures à 1/40 de micron.

Comparaison des résultats.

Il est intéressant de rapprocher le résultat des calculs de celui des mesures.

Par le calcul :

profondeur des ondulations : 0,000 025,
pas des ondulations : $a = 0{,}1$.

Par l'expérience :

profondeur des ondulations : 0,02,
pas des ondulations : 1,5 à 2 mm.

1° *Étude relative à la profondeur des ondulations.*

La différence trouvée peut s'expliquer parce que, dans le calcul théorique, on n'a pu tenir compte des flexions du support d'outil, de celui de la pièce et des irrégularités possibles de l'affûtage. Un comparateur en contact avec l'arbre de la fraiseuse révèle en effet l'existence des flexions, variables d'ailleurs, de cet organe. Ces vibrations proviennent du phénomène périodique de la coupe qui se traduit par la variation importante de l'effort de coupe au cours de chaque passage de dent.

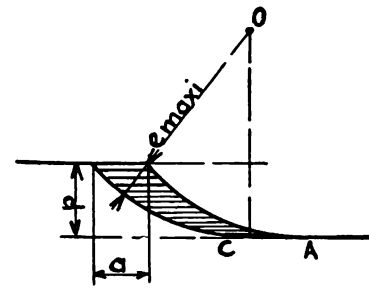


Fig. 7. — Formation du copeau.

Une dent de fraise rencontre, en effet, entre A et C une zone où l'épaisseur à tailler est inférieure à celle du copeau minimum (*fig.* 7). La dent frotte donc sur la pièce sans couper et des efforts élastiques importants prennent naissance (*fig.* 8).

Ensuite la dent commence à couper le métal et l'effort F_c diminue d'abord, puis augmente au fur et à mesure que le copeau croît en épaisseur jusqu'au moment où il s'annule brusquement quand la dent quitte la pièce (voir diagramme *fig.* 9).

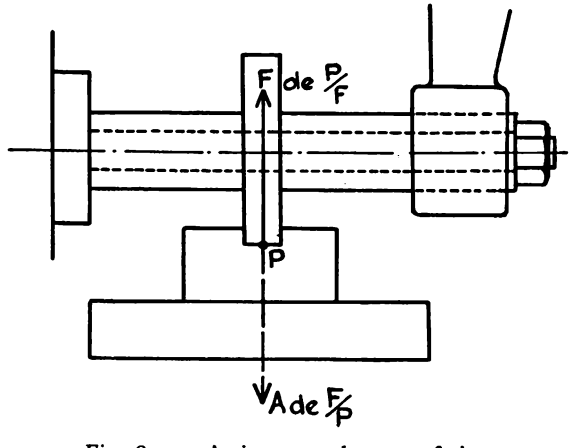


Fig. 8. — Actions sur le porte-fraise.

Si plusieurs dents sont en prise en même temps, l'effort sur la broche est plus important mais l'amplitude de ses variations est moins grande dans le temps. La flèche de flexion prise par la broche ne variera pas beaucoup et les ondulations qui en résultent sur la pièce, seront moins profondes.

On peut obtenir avec une surface acceptable même avec des fraises à denture droite si le nombre de dents est grand.

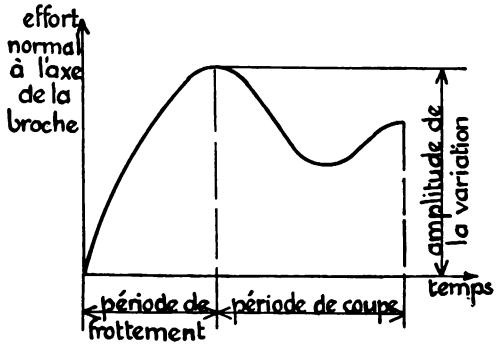


Fig. 9. — Variations des efforts de coupe.

Mais, lorsque les dents sont serrées, elles sont fragiles et laissent peu d'espace pour loger le copeau ; en outre le temps d'affûtage s'accroît. On donne donc la préférence aux fraises ayant peu de dents : les dents sont plus robustes. On préfère également la denture hélicoïdale, car l'épaisseur du copeau varie tout le long de l'arc d'hélice en contact avec la pièce et l'effort de coupe est plus constant. D'autre part on a toujours, avec les dentures hélicoïdales, deux ou trois dents en prise simultanément.

2° *Étude du pas de l'ondulation.*

La très grande différence qui existe entre le pas théorique des ondulations et le pas mesuré sur la pièce provient de ce que, sous l'action de l'effort de coupe variable, l'arbre porte-fraise vibre à une fréquence qui lui est propre et qui n'est pas nécessairement celle de l'effort. Ces deux variations de périodes différentes donnent naissance au phénomène connu du « battement » dont la fréquence est plus faible, ce qui a pour effet de donner un allongement du pas de l'ondulation (*fig.* 10).

L'examen à la loupe, de la surface taillée, montre que la surface ondulée présente des ondulations secondaires.

Les vibrations de l'arbre porte-fraise sont importantes si l'arbre est flexible (petit diamètre et grande longueur) et s'il est mal soutenu. Rappelons donc à ce sujet la *règle générale* « qui impose d'assurer toujours le maximum de rigidité à la pièce et à l'outil ».

Les essais précédents, lorsqu'ils sont exécutés avec un porte-fraise soutenu de part et d'autre et près de la fraise, conduisent à de meilleurs états de surface. Avec la même fraise et la même avance, on obtient un pas d'ondulation égal à 0,5 et une profondeur

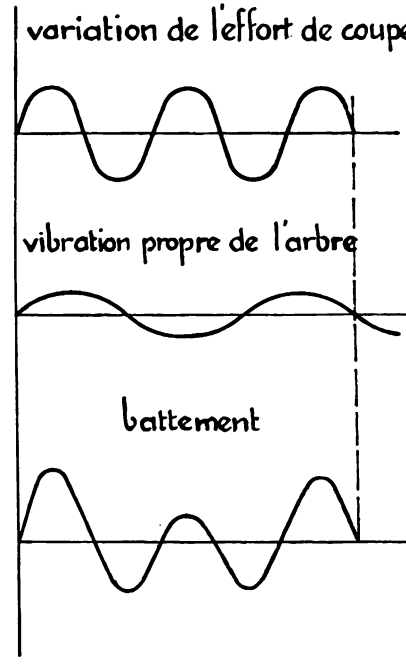


Fig. 10. — Vibrations pendant le fraisage.

d'onde égale à 0,005 ce qui est une très sérieuse amélioration. Ceci justifie les conseils relatifs à l'équipement des fraiseuses pour le fraisage de profil. C'est ainsi que, dans le cas d'emploi de la fraiseuse horizontale, on montera la fraise le plus près possible du bâti et on disposera toujours le support de façon à avoir A et B minima (*fig.* 11).

Si la surface à usiner est de faible largeur, on peut, dans certains cas, utiliser la fraiseuse verticale. On emploiera alors un mandrin porte-fraise aussi court que possible pour

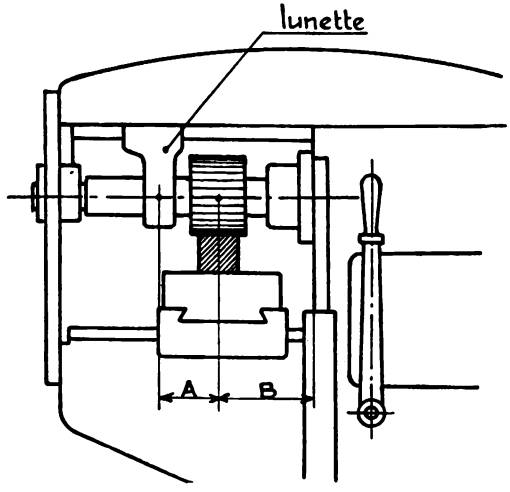


Fig. 11. — Fraisage sur machine horizontale.

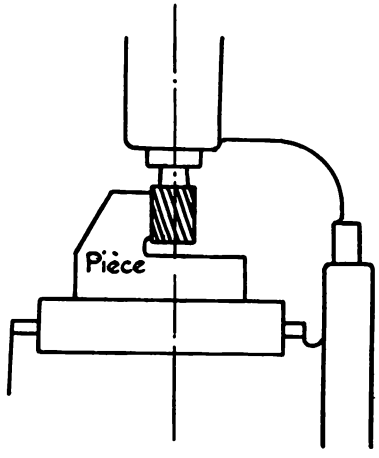


Fig. 12. — Fraisage sur machine verticale.

réduire sa flexion. On choisira de préférence une fraise hélicoïdale avec hélice à gauche car ainsi la fraise tendra à s'enfoncer dans son logement (cône de la broche) (*fig.* 12).

Effort de coupe - Montage et choix des fraises

Rappelons que l'action de contact du métal taillé sur une dent de fraise admet deux composantes : l'effort de coupe F_c normal à l'arête tranchante et situé dans le plan tangent à la surface cylindrique décrite par cette arête, l'effort de pénétration F_n perpendiculaire à F_c et contenu dans le plan normal à l'arête tranchante.

Quand la denture est droite, le plan qui contient F_c et F_n est perpendiculaire à l'axe de rotation de la fraise.

Si la denture est hélicoïdale, l'effort de coupe F_c peut être remplacé par ses deux composantes : F_t, située dans un plan perpendiculaire à l'axe et F_a parallèle à l'axe. Les

forces F_c et F_n tendent à faire fléchir l'arbre porte-fraise. Le plan de flexion est défini par l'axe et la résultante F des forces F_c et F_n, déplacées parallèlement à elles-mêmes et appliquées en O (*fig.* 14).

Comme le point d'application A des efforts de coupe se déplace de A en A′ et que les

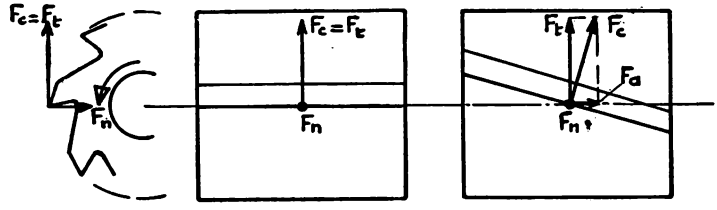


Fig. 13. — Efforts sur une dent de fraise hélicoïdale.

efforts F_t et F_n ne sont pas constants pendant la coupe, la trace du plan de l'effort de coupe F se déplace entre les deux positions F_1 et F_2 (*fig.* 14).

La variation continuelle des efforts de coupe, le déplacement continuel du plan de flexion expliquent les vibrations communiquées par la fraise à l'arbre porte-fraise.

La composante F_a des dentures hélicoïdales tend à chasser la fraise sur son axe. Cet effort est transmis à la broche qui doit nécessairement être en butée. On prévoit toujours deux butées (*voir Etude fonctionnelle des machines-outils*), afin de pouvoir

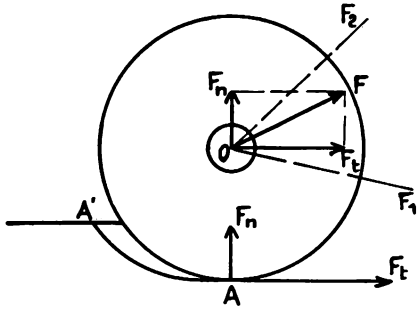


Fig. 14. — Efforts sur l'arbre porte-fraise.

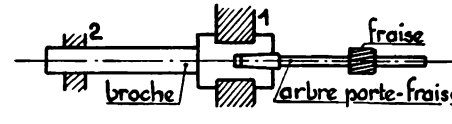


Fig. 15. — Montage de la broche d'une machine à fraiser.

utiliser indifféremment des fraises avec hélice à gauche ou à droite (*fig.* 15). Pour ne pas charger inutilement ces butées, on accouple, chaque fois que cela est possible, deux fraises hélicoïdales de sens contraires mais de même pas. On équilibre ainsi les forces axiales F_a (*fig.* 16 *a*-16 *b*).

Ce souci d'équilibrer les poussées axiales sur les broches de fraiseuse a donné naissance aux fraises à dentures alternées dont les arêtes tranchantes sont des hélices à droite sur une dent, à gauche sur la suivante et ainsi de suite...

Quand on ne peut monter qu'une seule fraise on choisit celle dont le sens d'hélice donne une poussée sur la broche (hélice à gauche). Si l'on est contraint d'utiliser une

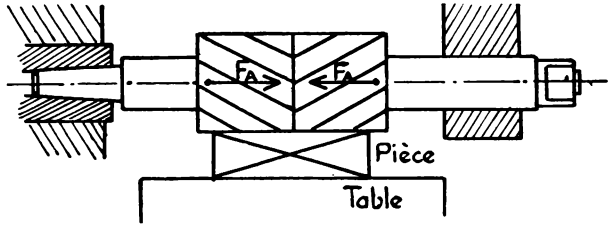


Fig. 16 *a.* — Montage de deux fraises couplées.

fraise avec hélice à droite on maintient la fraise dans le cône d'entraînement au moyen d'une tige de rappel (*fig.* 17).

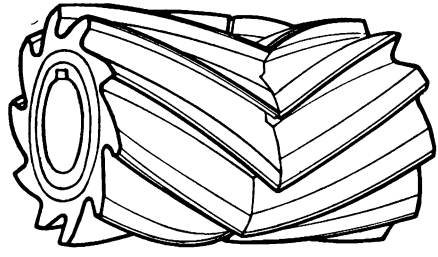


Fig. 16 *b.* — Fraises à hélices contraires, couplées.

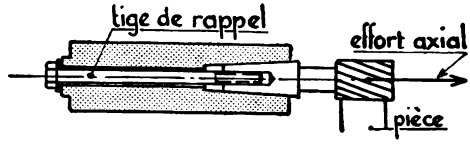


Fig. 17. — Justification de la tirette de rappel.

FRAISAGE DE FACE

Le fraisage de face est comparable à l'usinage sur l'étau-limeur ou sur le tour à l'aide d'un outil à charioter (*fig.* 18).

Dans les trois cas, la surface obtenue est l'enveloppe des positions *relatives* pièce-outil. L'outil est le même : un outil à charioter normalisé.

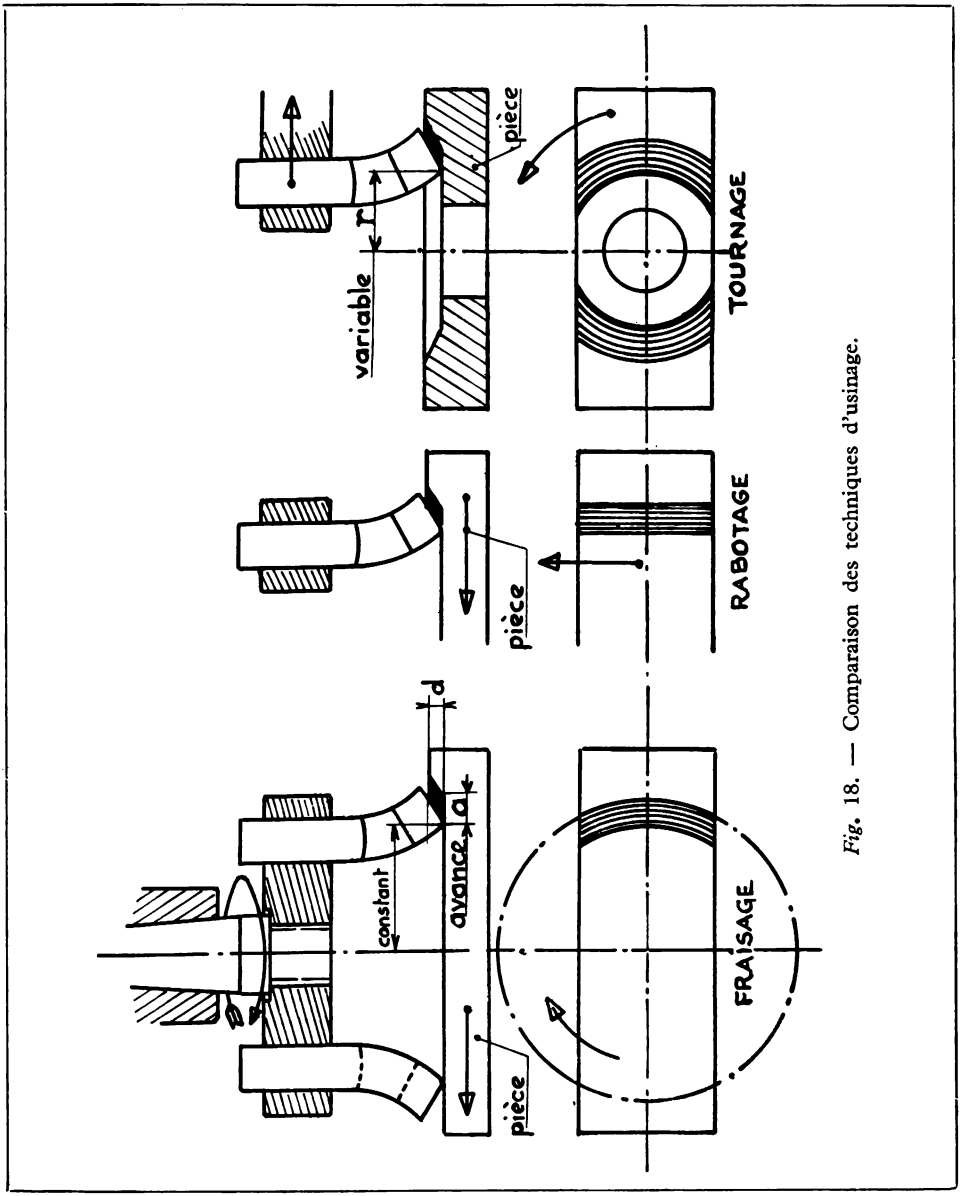


Fig. 18. — Comparaison des techniques d'usinage.

Étude de l'outil.

Les fraises de face comportent le plus souvent des outils rapportés pris dans des barreaux cylindriques en acier à coupe rapide (fraise système Antoine, *fig.* 19).

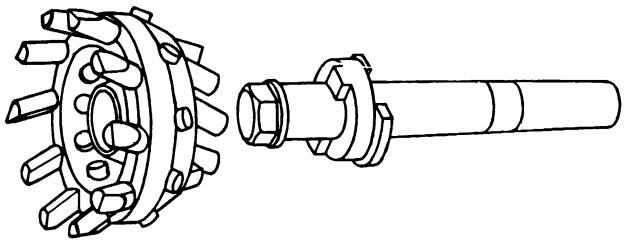


Fig. 19. — Fraise à dents multiples rapportées.

Ce sont des fraises très productives. L'outil est robuste, facile à affûter ; chaque barreau est ébauché et trempé séparément.

Les copeaux produits s'évacuent facilement. Il existe également des fraises estampées en forme de cloche (Etablissements Tallavignes et Deloche). Ce sont des fraises à grand rendement qui peuvent être affûtées un grand nombre de fois (*fig.* 20).

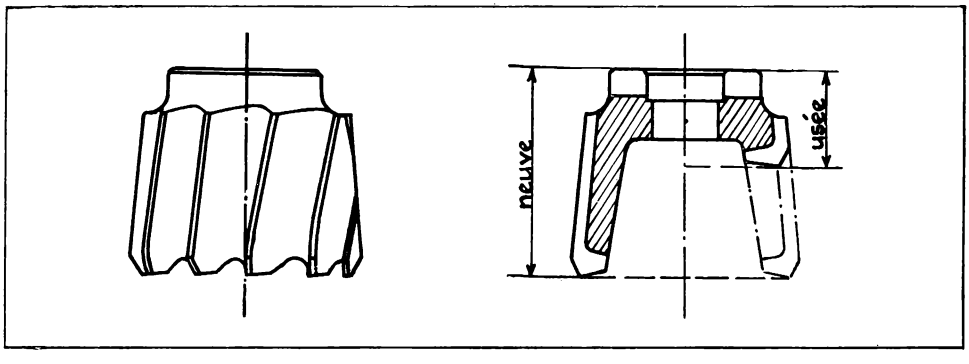


Fig. 20. — Fraise creuse « DAT ».

Qualité de la surface.

La pointe de la dent laisse un trait sur la surface de la pièce (arc de cycloïde). Les traits sont plus ou moins rapprochés selon l'avance par tour de fraise et le nombre de dents ; en général l'intervalle entre deux traits est égal à l'avance par tour de fraise parce qu'il y a toujours une dent légèrement plus longue que les autres. La pièce est à traits croisés car les dents « arrière » ne travaillent pas mais frottent toujours un peu sur la pièce qu'elles rayent. Cela est gênant car :

a) le frottement à vide des dents contribue à leur usure,

b) la course de la table se trouve augmentée puisqu'elle doit être égale à la longueur de la pièce majorée du diamètre de la fraise si l'on veut obtenir partout ce « trait croisé »

$$c = l + d \text{ (\textit{fig.} 21)}$$

Sur les fraiseuses verticales modernes, la broche n'est pas exactement perpendiculaire à la table ; de ce fait la face obtenue est légèrement creuse et le trait n'est plus croisé (*fig.* 22). L'angle d'inclinaison α a pour tangente, en moyenne, 0,0006 ; le creux ne dépasse pas ainsi 2/100 si l'on emploie une fraise ayant un diamètre voisin de 200 mm et si la pièce a environ 150 mm de largeur. On a évidemment intérêt à employer une grande fraise afin de diminuer cette concavité. Dans ce cas, la course de la table est égale à la longueur de la pièce.

Le fraisage de face exige une machine en parfait état ; la broche doit tourner très cor-

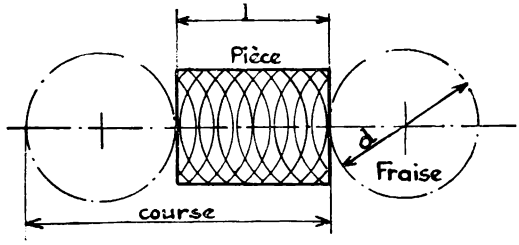


Fig. 21. — Production du trait croisé.

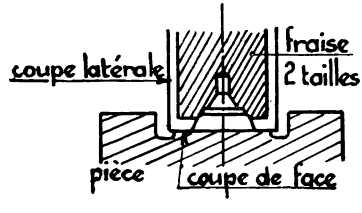


Fig. 23. — Mode d'action d'une fraise à deux tailles.

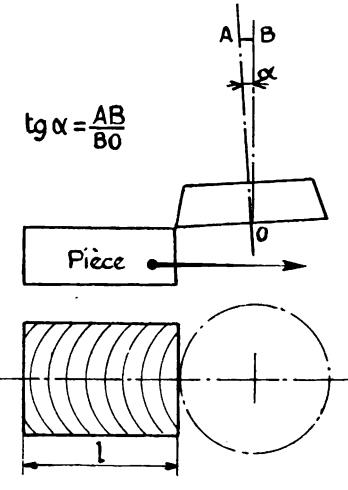


Fig. 22. — Production du trait simple.

rectement, sans jeu. En outre l'axe de la fraise doit coïncider parfaitement avec celui de la broche et toutes les extrémités des dents doivent être placées dans un plan normal à cet axe. Il est donc indispensable d'affûter la fraise en la montant sur son cône d'entraînement et non entre pointes.

Pour les petites surfaces, ou pour les fonds de rainure, les fraises dont nous venons de parler sont trop grosses ; on leur substitue des fraises à deux tailles (en bout et sur leur profil). Généralement le pas de la denture est insuffisant et le dégagement des copeaux est difficile ; il faut donc limiter la profondeur de passe (*fig.* 23).

Montage et réglage des outils.

L'assemblage des fraises avec la broche de la machine est obtenu par contact de surfaces coniques, ce qui assure la concentricité et l'annulation de tout jeu.

Le réglage des outils par rapport à la pièce est fait en utilisant les mêmes moyens de contrôle que pour les machines à raboter.

Efforts de coupe dans le fraisage de face.

Les trois composantes de l'effort de coupe, action de l'outil sur la pièce, sont tracées sur la *figure* 24.

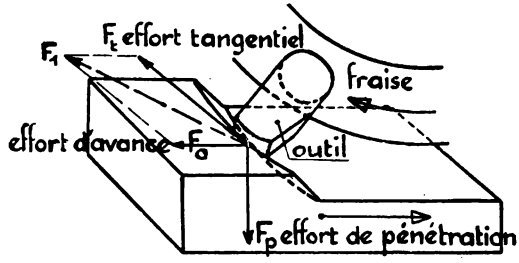


Fig. 24. — Actions d'une fraise sur la pièce.

La composante verticale F_p est équilibrée par la table et la console. La résultante F_1 des efforts F_t et F_a, situés dans le plan usiné est transmise de la pièce à la table par l'intermédiaire du bridage.

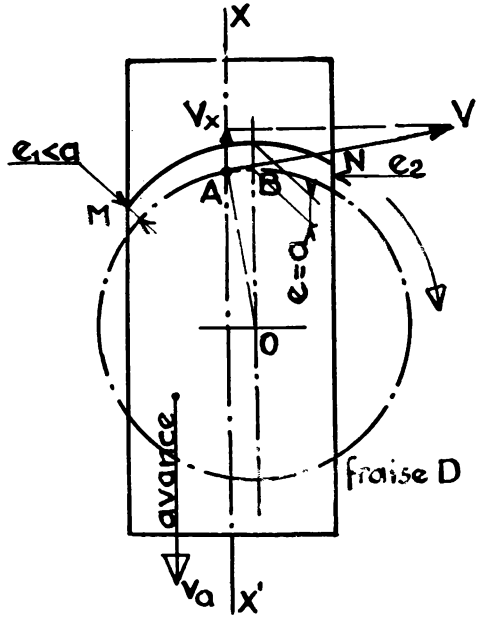


Fig. 26. — Fraisage en opposition.

Étudions, dans le plan de coupe, la résultante F_r des efforts relatifs aux diverses dents en prise. Sur la *figure* 25-1, la force résultante F_r admet une composante axiale A qui assure le contact de la vis de commande et de l'écrou en *a*.

Reportons-nous maintenant à la disposition de la *figure* 25-2, la résultante F_r admet une composante A qui tend à entraîner la table en raison du jeu qui existe dans l'écrou en *b*.

Il y a donc appel de la pièce sous la fraise et danger de rupture des dents. La disposition I est donc préférable de beaucoup. Elle consiste à placer l'axe de la fraise O légèrement décalé par rapport à l'axe de la pièce *xx'*, de façon que la composante axiale *Vx* du vecteur vitesse de coupe, soit en opposition avec le vecteur vitesse d'avance V_a (*fig.* 26).

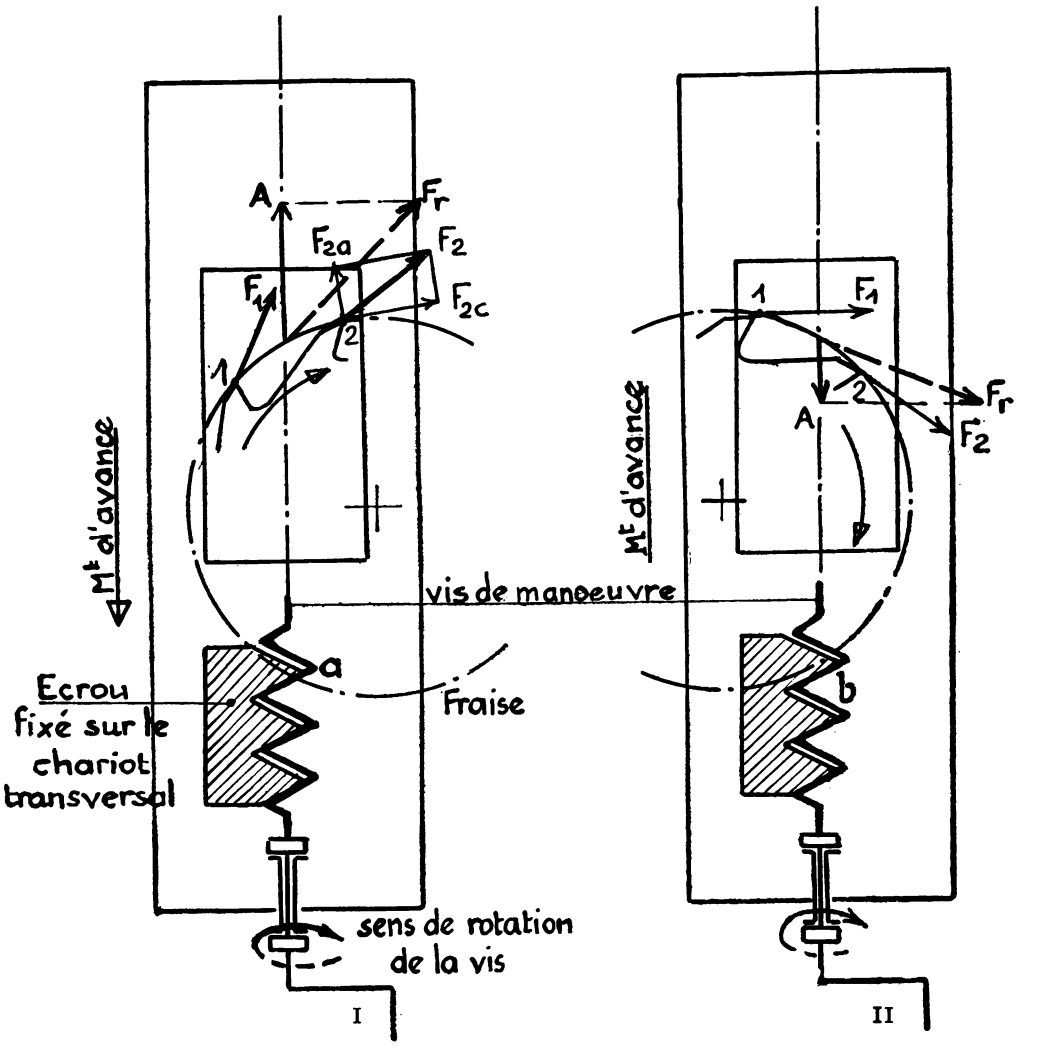


Fig. 25, *I* et *II*. — Jeu de vis et fraisage en opposition.

1 et 2, positions des dents.

F_1 et F'_1 composantes tangentielles de l'effort de coupe sur chaque dent ;
F_r résultante des efforts de coupe sur l'ensemble des dents ;
A composante de F_r suivant l'axe de déplacement de la table.

Épaisseur du copeau.

Choix du diamètre de la fraise.

L'épaisseur du copeau est plus faible en M et N qu'en B, sur la parallèle à l'axe de la table passant par O. En ce point on a : $e = a$ (*fig.* 26).

Si la fraise devient tangente au bord de la pièce (*fig.* 27), l'épaisseur du copeau devient nul : la fraise travaille dans de mauvaises conditions.

Pour avoir des épaisseurs de copeaux e_1 et e_2 peu différentes de l'avance par dent a, on choisit un diamètre de fraise sensiblement égal à deux fois la largeur de la pièce.

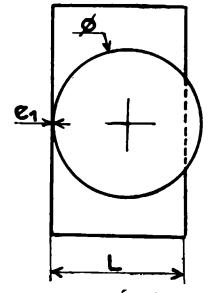


Fig. 27. — Épaisseur du copeau.

CONDITIONS DE COUPE DES FRAISES

Les conditions de coupe des fraises de face à outils multiples sont analogues à celles des outils de tour. Les résultats des recherches faites à l'occasion des travaux de tournage peuvent être appliqués au surfaçage avec outil de face.

La recherche des conditions d'emploi idéales des fraises à denture taillée, travaillant sur profil, s'est avérée extrêmement difficile ; l'état de la machine, l'affûtage plus ou moins soigné, le pas de la denture, l'état de surface de la planche de la dent, la déformabilité de la pièce et de son support, les possibilités de dégagement des copeaux, sont autant de paramètres qui viennent compliquer considérablement l'étude du fraisage.

Mouvement d'avance.

La vitesse du mouvement d'avance est choisie de façon que l'épaisseur du copeau e soit supérieure à celle du copeau minimum e'. Il faut avoir $e > e'$.

1° *Fraisage de face.*

L'épaisseur maximum du copeau est égale à l'avance par dent et par tour a. On a donc $a = e \geqslant e'$ (*fig.* 26).

a s'exprime en mm par dent et par tour de fraise. L'avance A en mm/mn s'exprime par la relation :

$$A = azN$$

où z est le nombre de dents et N le nombre de tours/mn de la fraise.

Mais si V est la vitesse de coupe de la fraise en mm/mn, on a :

$$A = az \cdot \frac{V}{\pi D}$$

$$= 0{,}32\, a \cdot z \cdot \frac{V}{D}$$

2° *Fraisage de profil.*

a) CALCUL DE L'AVANCE *a* PAR DENT ET PAR TOUR.

L'épaisseur maximum du copeau est fonction de la profondeur de coupe p et du diamètre D de la fraise.

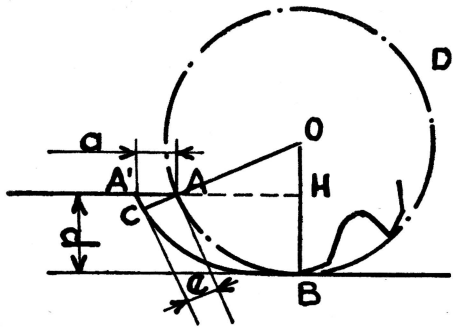


Fig. 28. — Calcul de l'avance par dent et par tour.

Examinons la *figure* 28 ; nous pouvons écrire :

AC $= e$, épaisseur maximum du copeau

AA' $= a$

$$OH = \frac{D}{2} - p$$

Le triangle curviligne AA'C peut être assimilé à un triangle rectangle en C. Les triangles AA'C et AOH sont semblables, ce qui permet d'écrire :

$$\frac{AC}{AA'} = \frac{AH}{OA}$$

d'où :

$$AC = AA' \cdot \frac{AH}{OA}$$

$$e = a \cdot \frac{AH}{\frac{D}{2}}$$

$$\text{Mais } AH = \sqrt{OA^2 - OH^2} = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - p\right)^2} = \sqrt{p(D-p)}$$

D'où :

$$e = \frac{2a}{D}\sqrt{p(D-p)} \qquad \text{et} \qquad a = e\frac{D}{2\sqrt{p(D-p)}}$$

Cette formule montre que si p diminue, a augmente lorsque e et D restent constants. Donc, il faudra, en finition, une avance par dent assez grande.

Dans la majorité des cas p est petit par rapport à D et on peut, dans la formule précédente, remplacer D-p par D. Il vient alors :

$$a = 0{,}5\,e \cdot \frac{D}{\sqrt{pD}} = 0{,}5\,e\sqrt{\frac{D}{p}} \qquad (1)$$

Application numérique.

Passe de finition : $p = 0{,}5$ mm.

Fraise de D $= 100$ mm dont la finesse d'arête autorise un copeau d'épaisseur minimum

$$e = e' = 0{,}05 \text{ mm}$$

Calculons l'avance par dent et par tour qui donnera ce copeau minimum.

Nous avons :

$$a = 0{,}5 \times 0{,}05 \times \sqrt{\frac{100}{0{,}5}} = 0{,}35 \text{ mm}$$

b) CALCUL DE L'AVANCE *A* EN MM PAR MINUTE.

Si V est la vitesse de coupe en mm/mn,

z le nombre de dents de la fraise,

N le nombre de tours/mn.

Nous avons :

$$A = a \cdot z \cdot N$$

mais :

$$N = \frac{V}{\pi D}$$

d'où

$$A = a \cdot z \cdot \frac{V}{\pi D}$$

Remplaçons a par sa valeur tirée de (1). il vient :

$$A = 0{,}5\, e \sqrt{\frac{D}{p}} \cdot z \cdot \frac{V}{\pi D}$$

d'où :

$$A = 0{,}16\, e \cdot z \cdot \frac{V}{\sqrt{pD}}$$

Application numérique.

Reprenons l'exemple précédent :

Fraise de 8 dents — Vitesse de coupe de 20 m/mn

$$A = 0{,}16 \cdot 0{,}05 \cdot 8 \cdot \frac{20\,000}{\sqrt{0{,}5 \cdot 100}} = 180 \text{ mm/mn.}$$

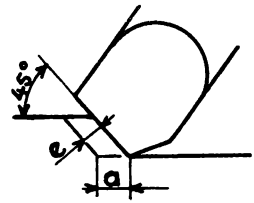


Fig. 29.
Avance par dent.

c) VALEURS PRATIQUES DES VITESSES D'AVANCE.

— Fraisage de face.

Tableau des Avances par dent.

Métaux	Fraises à denture taillée	Fraises à outils rapportés
Acier	0,05 à 0,2	0,05 à 1
Fonte grise	0,1 à 0,5	0,1 à 2
Bronze et laiton	0,1 à 0,3	0,1 à 1,5
Alliage d'aluminium	0,05 à 0,17	0,05 à 0,6

Les valeurs minima ne sont acceptables que pour des fraises extrêmement bien affûtées, avec angle de direction égal à 45°. On remarquera que, dans ce cas, $e = 0{,}7\, a$ (*fig.* 29).

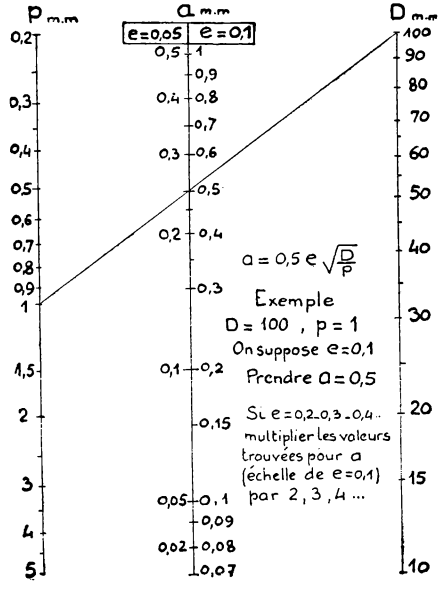
— Fraisage de profil.

On utilise la formule :

$$a = 0{,}5\, e \sqrt{\frac{D}{p}}$$

ou bien l'abaque ci-contre.

Avec un affûtage soigné on adoptera pour valeur minimum de e : 0,025 mm.



Les valeurs maxima de l'avance par dent seront celles-ci :

Acier	1 mm.
Fonte grise	2 mm.
Bronze et laiton	1,5 mm.
Alliages d'aluminium	0,6 mm.

d) CHOIX DES AVANCES.

Le choix de l'avance à adopter dépend :

— de la qualité de l'état de surface cherché : finition ou ébauche ;

— de la résistance de la denture.

1° *État de surface.*

Nous avons vu que les dimensions des ondulations laissées par les dents de fraise diminuent avec l'avance. Il importe donc, en finition, de choisir l'avance minimum et d'utiliser des fraises affûtées avec beaucoup de soin. Dans ce cas, le copeau taillé minimum pour l'acier peut être égal à 0,02 mm. Mais on choisit couramment par précaution e = 0,05 mm.

L'avance a se détermine alors au moyen des formules et abaques donnés aux paragraphes précédents.

2° *Résistance de la fraise.*

L'effort qui s'exerce sur les dents des fraises est proportionnel à la section du copeau et, par suite, à l'avance par tour.

L'effort de coupe, s'il est très important, peut provoquer la rupture de la dent et même, dans certaines conditions, celle de la fraise.

L'augmentation du rendement des aciers à outils permet de diminuer le nombre de dents des fraises ce qui a pour effet de les rendre plus robustes.

Les fraises à dents rapportées sont aussi plus robustes que les fraises à denture taillée et le remplacement d'un outil brisé est facile. Ces fraises permettent de fortes avances.

Vitesse de coupe.

On détermine la vitesse de coupe à l'aide des abaques de l'ouvrage de technologie pour la classe de seconde.

La fraise étant un outil bien refroidi, la vitesse de coupe varie peu en fonction des dimensions du copeau.

On peut adopter les valeurs, contrôlées par l'expérience, que conseille la Société *Cincinnati* dans le tableau ci-dessous :

	Ébauche	Finition
Fonte	20 à 25 m/mn	25 à 32 m/mn
Acier (Rr) *e* :		
35 à 58 kg/mm²	25 à 32 m/mn	33 à 40 m/mn
60 à 70	12 à 16	16 à 20 m/mn
85 à 100	8 à 10	10 à 12
Bronze	30 à 40	40 à 50
Laiton	65	80
Aluminium	200	320

Puissance absorbée par la coupe.

La puissance absorbée par la coupe est donnée par la relation :

$$P \text{ en Watts} = F \cdot \frac{V}{60}$$

où F est l'effort tangentiel moyen de coupe en Newtons,

V la vitesse de coupe en m/mn.

L'effort F est assez difficile à déterminer.

Les constructeurs de fraiseuses ont établi des formules qui tiennent compte du débit de copeaux par minute.

Première méthode :

Formule empirique Cincinnati.

$$P = P_0 D^{3/4}$$

où D est le débit de copeaux exprimé en cm^3/mn et P_0 la puissance en kW nécessaire pour produire 1 cm^3 de copeaux et P kW la puissance absorbée par la coupe.

$$D = A l p$$

A : avance en cm/mn,

l : largeur de coupe en cm,

p : profondeur de coupe en cm.

Valeurs moyennes de P_0 en kW/cm³ de métal taillé par minute.

Types de fraises	Métal de la fraise	Métal à usiner	Po en kW/cm³
Fraisage de face :			
Fraises cylindriques à 2 tailles.	A.R.S.	Aciers au carbone ou alliés (Rr) e = 600 à 1 000 N/mm²	0,12
Fraises à outils rapportés.....		Fonte	0,08
		Alliages d'aluminium	0,07
Fraises cylindriques à surfacer.	Carbures métalliques	Aciers au carbone ou alliés..	0,18
Fraisage de profil :		Fonte	0,08
Fraises cylindriques hélicoïdales à 50 70 70°	A.R.S.	Aciers au carbone ou alliés ...	0,21
		Fonte.....	0,12

Deuxième méthode :

La production de copeaux, exprimée en cm³ par mn et par kW a été déterminée expérimentalement :

$$Q \text{ cm}^3/\text{mn}.$$

La puissance P en kW de la machine étant connue, il est possible de déterminer le volume de copeaux qui peut être produit par minute :

$$V \text{ cm}^3 = QP$$

Voici un tableau qui donne les valeurs du débit de copeaux Q en cm³/mn/kW.

FONTE	Q = 22
ACIER C 25 : (Rr). = 500 N/mm² (1)	11
ACIER C 70 : (Rr). = 900 N/mm² (1)	8
ACIERS ALLIÉS	7
FONTE MALLÉABLE	16
LAITON-BRONZE.....	34
ALUMINIUM	55

Soit à enlever 4 mm sur une pièce de 600 × 100 en acier à 500 à 600 N/mm² (*fig.* 30).

$$Q = 11 \text{ cm}^3/\text{mn/kW}.$$

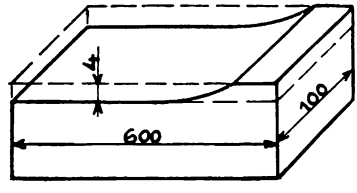


Fig. 30. — Pièce à usiner.

Volume à enlever :

$$4 \times 100 \times 600 = 240\,000 \text{ mm}^3 = 240 \text{ cm}^3.$$

Avec une fraiseuse de 3 kW, disponibles à la broche, on peut produire :

$$11 \times 3 = 33 \text{ cm}^3/\text{mn}.$$

Le temps nécessaire à l'exécution sera donc :

$$T = \frac{240}{33} = 7' 20''.$$

(1) Dans le système MK,S : (Rr). = 50 kgf/mm².
(Rr). = 90 kgf/mm².

LES MACHINES

Dans les ateliers d'outillage, on utilise surtout des machines universelles :

machines à tête universelle : Huré, Gambin, Sagem,

machines à tête inclinable,

machines à table orientable.

Au contraire les travaux de série exigent des machines plus simples qui sont également plus rigides car elles ne comportent pas autant d'assemblages mobiles ; ces machines sont verticales ou horizontales.

Ces machines sont bien connues du lecteur.

Machines à cycle automatique.

Pour les travaux de très grande série on a créé des machines dont la table se déplace suivant un cycle établi une fois pour toutes et qui correspond à la fabrication d'une pièce bien déterminée. Dans la fraiseuse d'opérations des Etablissements Rouchaud de Limoges (E.R.E.L.) la table est commandée par une came dont la forme est d'ailleurs assez simple. La *figure* 31 montre comment elle attaque un levier lié à la table par une rotule. Le secteur AB de la came correspond au retour rapide de la table qui, lui, n'est pas positif puisque c'est un ressort qui assure le rappel.

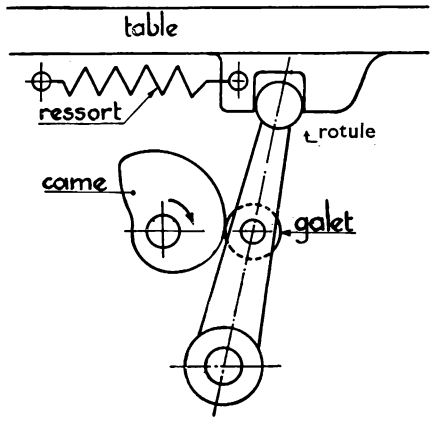


Fig. 31. — Fraiseuse à cycle automatique : avance de la table.

Pour passer d'une fabrication à une autre, on doit changer la came.

La loi de mouvement de la came peut être extrêmement variable ; elle peut tenir compte du groupement de plusieurs pièces en ligne sur la table. Voici deux exemples parmi les plus simples (*fig.* 32) :

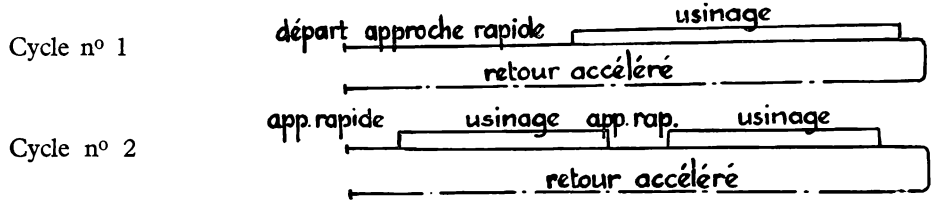


Fig. 32. — Exemples de cycles automatiques.

On estime à 5 heures le temps d'exécution d'une came. Son amortissement, même sur une petite série de pièces, est donc facile.

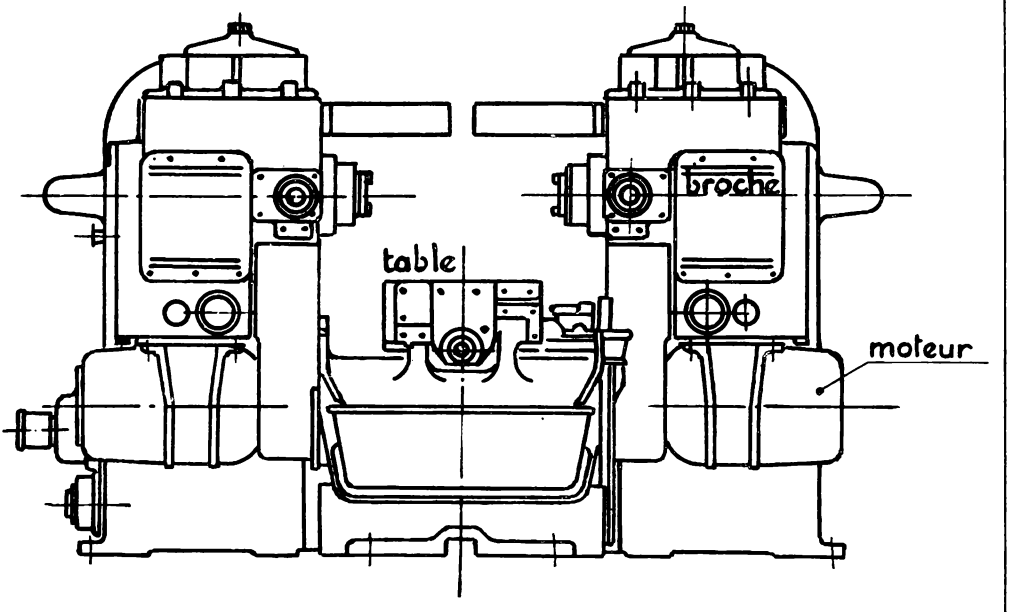


Fig. 33. — Fraiseuse à deux têtes (dite « Duplex »).

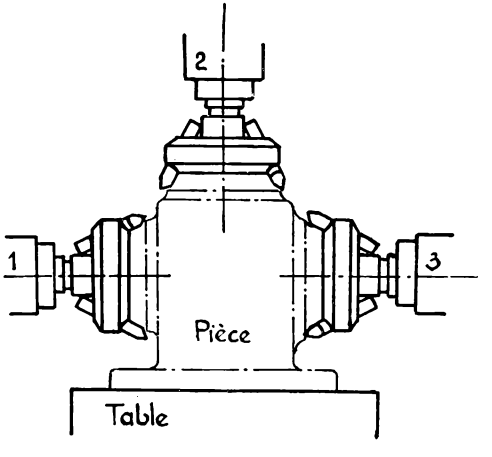


Fig. 34. — Principe d'une machine à trois têtes.

Très souvent, les machines à têtes multiples peuvent être réalisées en groupant sur un bâti en tôle d'acier soudé, des têtes d'usinage analogues aux unités de perçage décrites page 135. On peut ainsi réaliser, au minimum de prix, des machines spéciales dont les principaux éléments sont réutilisables quand la fabrication vient à changer.

Fraiseuses à têtes multiples.

Avec ces machines on peut usiner simultanément plusieurs surfaces sur une même pièce ou, tout au moins, on peut les exécuter sans démontage.

Il existe des machines qui comportent :

— deux têtes opposées (*fig.* 33).

— trois têtes : deux opposées dans le plan horizontal et une dans le plan vertical (*fig.* 34 et 35).

— plusieurs têtes parallèles, verticales ou horizontales.

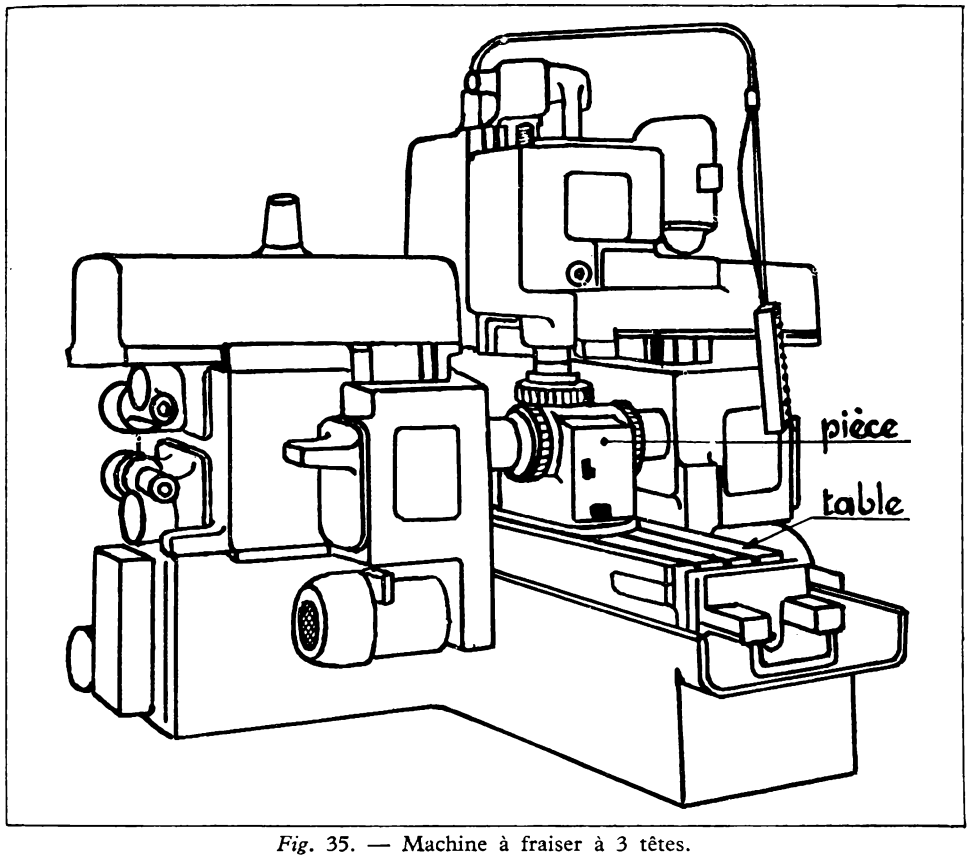


Fig. 35. — Machine à fraiser à 3 têtes.

La table de ces machines peut être à commande hydraulique ; dans ce cas l'avance peut être réglée à une valeur quelconque sans utiliser de boîte de vitesses complexe. L'action du fluide de poussée doit équilibrer l'effort de coupe. Comme celui-ci varie quelquefois rapidement, l'avance, de ce fait, peut être irrégulière et même excessive par moment. Aussi la commande hydraulique est-elle asservie par un système vis et écrou (pilotage).

Toutes ces machines sont prévues surtout pour réaliser du fraisage de face. Les machines à trois têtes ont souvent l'aspect de machines à raboter et, pour cette raison, sont appelées fraiseuses-raboteuses. Il est intéressant de noter que la table de ces machines a un mouvement d'avance lent tandis que la table des raboteuses a un mouvement rapide de coupe.

Certaines de ces machines possèdent des têtes orientables et ceci permet l'usinage de prismes dont les faces font des dièdres quelconques.

Fraiseuse dont les vecteurs vitesse de coupe et vitesse d'avance sont de même sens.

Principe.

La table de cette fraiseuse est, à tous instants, butée dans les deux sens. La commande peut, par exemple, être obtenue à l'aide de deux vis de table, de même pas, mais l'une est à droite et l'autre à gauche. Elles tournent en sens contraires et ceci fait que l'une s'appuie sur les filets de l'écrou par les flancs droits et l'autre par les flancs gauches.

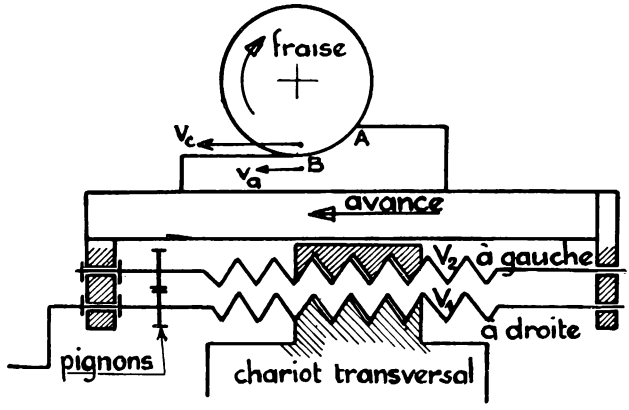


Fig. 36. — Machine à fraiser en « avalant » : mouvement de table.

Dans ces conditions les dents de la fraise peuvent attaquer la pièce en agissant par-dessus comme le montre la *figure* 36. La dent prend ainsi, dès sa mise au contact de la pièce, le copeau d'épaisseur maximum et cette épaisseur décroît ensuite de A jusqu'en B. Au voisinage de B, l'outil taille un copeau dont l'épaisseur peut être inférieure au copeau minimum parce que l'amorce de rupture se propage devant l'outil (*fig.* 37).

On dit que cette fraiseuse travaille en « avalant » ou avec concordance des vecteurs vitesse de coupe et d'avance (par opposition avec ce qui se passe sur les fraiseuses habituelles).

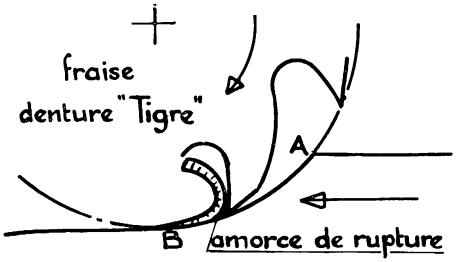


Fig. 37. — Fraisage en concordance : formation du copeau.

Utilisation pour des travaux de série.

L'outil pouvant travailler dans les deux sens l'usinage de deux ou de plusieurs pièces se fait avec un minimum de déplacement improductif de la table (*fig.* 38).

Imaginons la pièce 1 terminée ; la fraise est en O. La table se déplace de O_1 en O : la pièce 2 est usinée en concordance. Pendant ce deuxième usinage, on change la pièce 1.

La table se déplace ensuite en sens inverse, O_2 vient en O ; la pièce 1 est usinée en opposition et on remplace la pièce 2 (*fig.* 38-b).

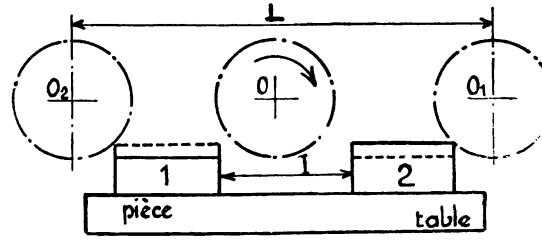


Fig. 38 *a.* — Machine à fraiser travaillant dans les deux sens.

La table se déplace de O_1 en O en sens inverse : la pièce 2 est usinée en concordance et on remplace la pièce 1 et ainsi de suite.

On voit donc que tous les déplacements sont productifs (*fig.* 38-*c*).

La machine à fraiser la plus ancienne avec concordance des vecteurs vitesse et avance, est la Jerwag, machine allemande peu répandue en France. Mais on retrouve, sur

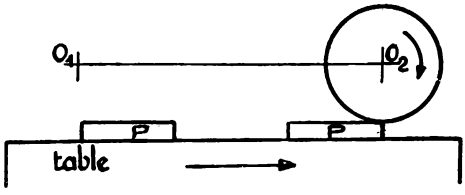


Fig. 38 *b.* — 1er temps : fraisage en opposition.

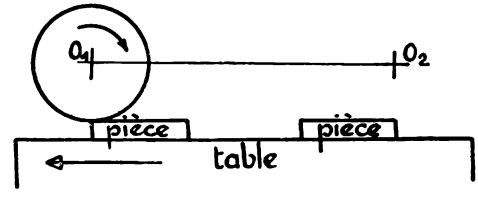


Fig. 38 *c.* — 2e temps : fraisage en concordance.

certaines machines à tailler les engrenages, le même principe de fonctionnement. On taille généralement en avalant pendant la finition : l'état de surface en est amélioré.

EXÉCUTION DES SURFACES ASSOCIÉES

Plans orthogonaux.

Sur fraiseuse verticale, on emploie une fraise à deux tailles qui donne ainsi :

plan 1 : un fraisage de profil ;
plan 2 : un fraisage de face (*fig.* 39).

Le fini n'est donc pas le même sur les deux faces et c'est la face 2 qui est la plus précise.

Si la surface 1 doit servir de guidage, il vaut mieux utiliser la fraise comme l'indique la *figure* 40 soit sur une fraiseuse horizontale, soit sur une fraiseuse verticale en montant la pièce sur une équerre.

Si l'on veut obtenir deux plans ayant le même degré de fini et de précision, il faut les usiner séparément en fraisage de face tous deux. Mais il importe dans ce cas, de prévoir un dégagement d'outil venu de fonderie ou obtenu au moyen d'une fraise à trancher ou d'une fraise-scie (*fig.* 41).

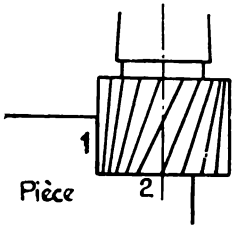


Fig. 39. — Fraisage avec fraise 2 tailles.

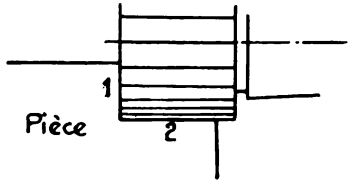


Fig. 40. — Fraisage avec fraise rouleau.

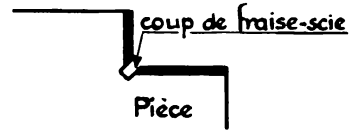


Fig. 41. — Préparation d'un fraisage sur deux faces.

Plans parallèles.

Les plans parallèles peuvent être obtenus par déplacement de la pièce sous la fraise, grâce à la manœuvre des chariots (*fig.* 42-43).

Chaque fois que c'est possible et économique, il est préférable, pour avoir plus de précision de procéder encore au fraisage de face.

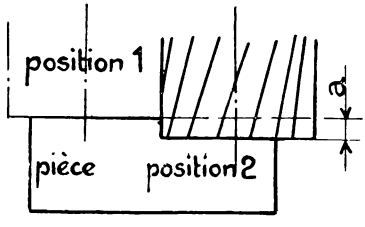


Fig. 42. — Fraisage de 2 faces perpendiculaires en deux réglages.

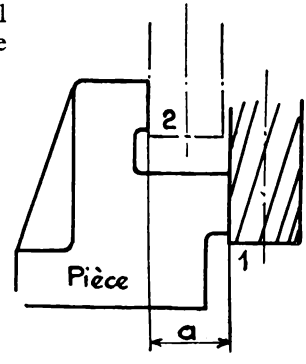


Fig. 43. — Fraisage de 2 faces parallèles en deux réglages.

On peut prévoir pour les travaux de série, des fraises accouplées, montées souvent sur un arbre horizontal (voir *fig.* 44).

Pour l'usinage des surfaces étroites on utilise des fraises à deux ou trois tailles, monoblocs. Lorsque les surfaces sont larges on utilise des fraises constituées par des plateaux de fonte sur lesquels sont montés des outils cylindriques : on obtient ainsi de véritables fraises de face.

L'écartement des fraises est réglé à l'aide d'un empilage de rondelles intercalaires dont on modifie la composition après chaque réaffûtage (*fig.* 44*a*-44*b*). On constitue des jeux de rondelles analogues à des jeux de cales étalons :

Variation	par 1/100	9 bagues de 1,01 à 1,09.
—	par 1/10	9 bagues de 1,1 à 1,9.
—	par mm	9 bagues de 1 à 9.
—	par 10 mm	9 bagues, etc.

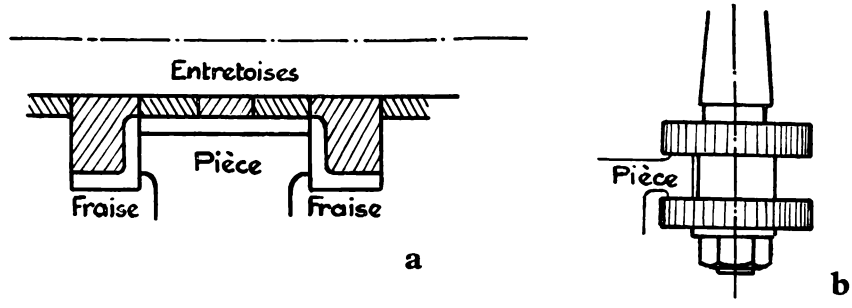


Fig. 44. — Fraisage de faces parallèles.

Exécution de plusieurs plans parallèles ou perpendiculaires.

On utilise des trains de fraises montés sur une fraiseuse à arbre horizontal et qui usinent les surfaces parallèles à l'axe en fraisage de profil et les surfaces normales à cet axe en fraisage de face.

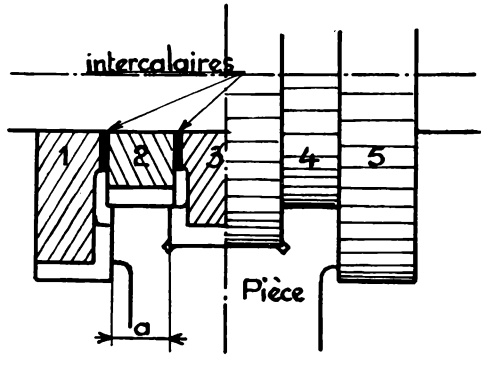


Fig. 45. — Fraisage de faces parallèles et perpendiculaires.

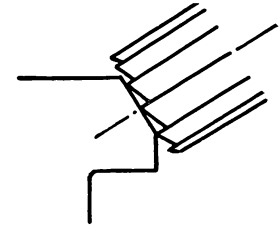


Fig. 46.
Fraisage oblique.

Sur l'exemple de la *figure* 45 on a prévu deux fraises 1 et 5 à deux tailles ; deux fraises 2 et 4 à une taille et la fraise centrale 3 à trois tailles. Au cours des réaffûtages il faut tenir les cotes telles que *a*.

L'établissement d'un train de fraises est assez délicat car il faut s'efforcer de n'imposer à aucune dent d'avoir à couper le copeau taillé minimum. L'effort total de coupe

étant très élevé on ne peut utiliser des trains de fraises que sur de très puissantes machines.

Exécution des plans formant un dièdre quelconque.

Ce travail peut être obtenu :

a) *par fraisage de face*, sur machine verticale à tête inclinable ou sur machine universelle (*fig.* 46). La difficulté consiste à incliner avec précision l'arbre porte-fraise.

La lecture sur la graduation conduit (même, si on utilise un vernier) à quelques minutes d'erreur.

On obtient plus de précision si on utilise une broche rectifiée, une pige et un gabarit (*fig.* 47) ou une barre-sinus et un comparateur à cadran (*fig.* 48).

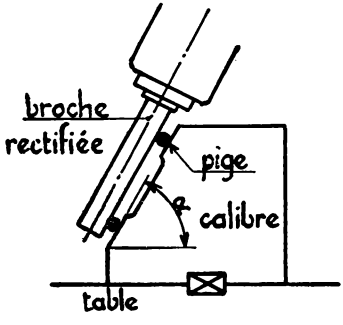


Fig. 47. — Réglage de l'inclinaison de la broche : calibre.

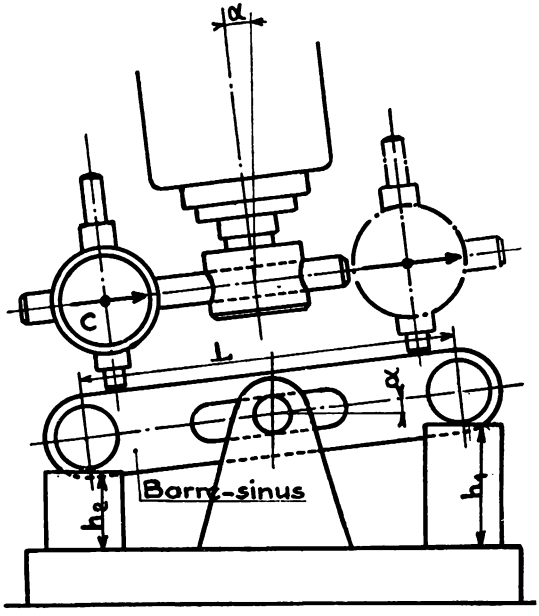


Fig. 48. — Réglage de l'inclinaison de la broche par barre-sinus. $\sin \alpha = \frac{h_1 - h_2}{L}$

Si la tête est lourde le réglage est long et délicat. Ce procédé ne convient que pour l'usinage de quelques pièces en série non renouvelable.

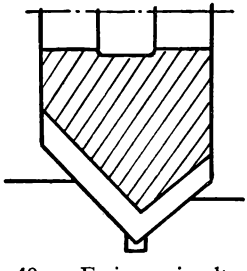


Fig. 49. — Fraisage simultané de 2 faces à la fraise biconique.

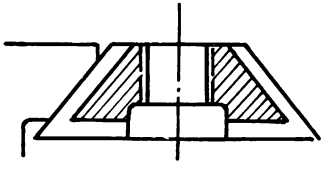


Fig. 50. — Fraisage de profil d'une face oblique à la fraise plan conique.

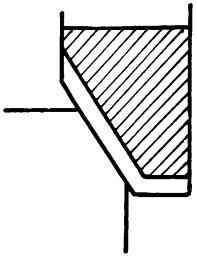


Fig. 51. — Fraisage d'une face à la fraise plan conique.

b) *Par fraisage de profil*, en utilisant des fraises plan-coniques ou biconiques (*fig.* 49, 50, 51).

Avec les fraises coniques, la précision angulaire est fonction du soin apporté à l'affûtage.

c) *En utilisant un porte-pièce incliné.*

L'inclinaison de la face 2 par rapport à la face 1, primitivement usinée, est obtenue grâce à un porte-pièce rigide. La broche de la machine conserve sa position normale (verticale, ou horizontale). Ce procédé convient bien aux travaux de série périodiquement renouvelable (pas de réglage à faire, constance de l'angle α) (*fig.* 52).

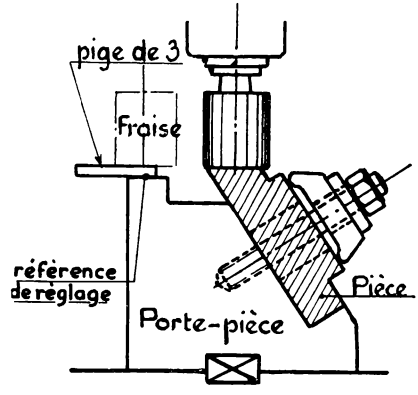


Fig. 52. — Fraisage avec porte fraise incliné.

Exécution des polyèdres.

Les prismes réguliers peuvent être exécutés en montant les pièces entre les pointes d'un diviseur (v. technologie pour le Fraisage Arnaud et Rollet). Chaque face est alors usinée par fraisage de face de préférence au fraisage de profil. Si la pièce est longue, flexible, elle doit évidemment être soutenue.

3. — LE BROCHAGE

Lorsqu'on exécute une opération de surfaçage par rabotage sur une pièce en métal de grande résistance spécifique à la coupe, la section du copeau taillée est limitée :

a) par la résistance de l'outil,

b) par la puissance de la machine.

Dans le premier cas, on peut faire travailler deux ou plusieurs outils côte à côte (*fig.* 1) ou l'un après l'autre (*fig.* 2). Dans le second, on doit effectuer plusieurs passes.

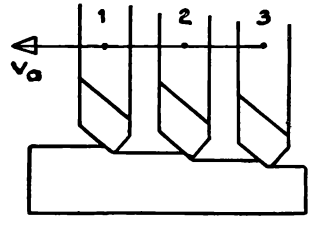


Fig. 1. — Rabotage avec outils en parallèle.

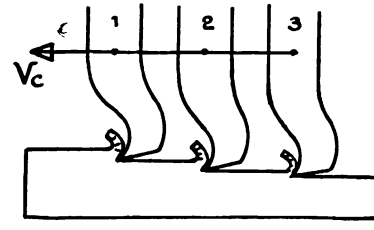


Fig. 2. — Rabotage avec outils en série.

Imaginons que l'on ait à réaliser une rainure ; on pourra utiliser, comme sur la *figure* 2, deux ou plusieurs outils disposés l'un après l'autre, et effectuer plusieurs passes. Le temps de retour des outils est évidemment perdu. Si la profondeur de passe est faible, on peut, en multipliant les outils, effectuer le travail en une seule passe. Pour ne pas imposer à la machine un effort de coupe trop grand, on ne fait travailler que 4 ou 5 outils en même temps, et chacun d'eux coupe en copeau de faible épaisseur. Cela conduit, pour enlever une épaisseur appréciable de métal, à utiliser un nombre

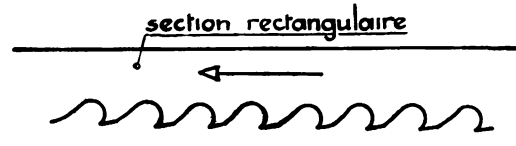


Fig. 3. — Forme des dents de broche.

important d'outils. Pour éviter le montage difficile de ces outils sur un support volumineux, on a préféré les tailler directement dans une barre d'acier rapide. L'outil ainsi constitué a reçu le nom de broche (*fig.* 3). Le mouvement de coupe de la broche est une translation ; quand toutes les dents de la broche ont taillé leur copeau, l'opération est terminée.

Mode d'action d'une broche.

a) *Étude d'une broche travaillant sur un seul côté* (fig. 4).

Examinons l'action de la pièce sur l'outil : chaque dent étant un outil-pelle, l'effort de coupe F admet deux composantes ; l'une tangentielle F*c*, et l'autre normale F*p*. Étudions l'équilibre de la broche : il faut opposer aux efforts de coupe *f* correspondant

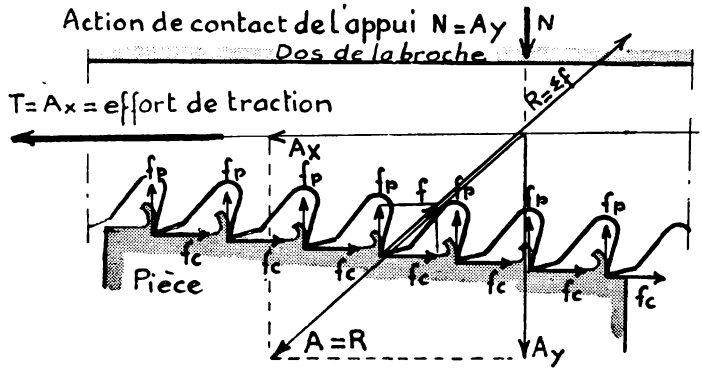


Fig. 4. — Répartition des efforts de coupe sur une broche.

à chaque dent une force A, égale et directement opposée à leur résultante. Cette force A peut être décomposée en une force T (*fig.* 4), dirigée suivant le vecteur vitesse du mouvement de translation, et une force N, normale au dos de la broche. La force T est l'effort à exercer sur la broche pour obtenir sa translation ; l'effort N ne peut être fourni que par l'action de la glissière sur laquelle l'outil viendra s'appuyer. Cette glissière doit évidemment se trouver au droit de la pièce et doit se prolonger un peu du côté du gros bout de la broche (*fig.* 4 *et* 5).

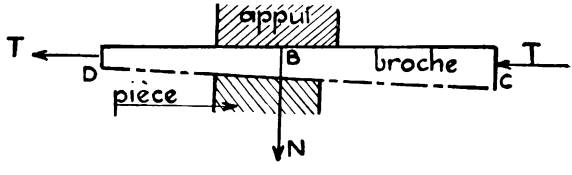


Fig. 5. — Mode d'action d'une broche.

L'effort T peut s'exercer en C. Dans ce cas, la broche est comprimée entre B et C, et il y a danger de flambement. Cette disposition ne convient qu'à des broches courtes, enlevant peu de métal, et souvent appelées « mandrins » ; l'opération correspondante est le mandrinage.

L'effort T peut aussi être appliqué en D. Dans ce cas, la broche est tirée et travaille à la traction entre D et B. Cette disposition, plus favorable pour la broche, est la plus généralement employée : l'opération porte le nom de brochage.

b) *Étude d'une broche symétrique* (voir fig. 6).

Les efforts sur les dents opposées ont la même intensité. Les composantes normales F_p s'équilibrent deux à deux. L'effort à exercer sur la broche, pour équilibrer l'action du métal usiné sur les dents, est T, qui doit être dirigé suivant l'axe de la broche et dans le sens du déplacement : on a $\sum F_c = T$.

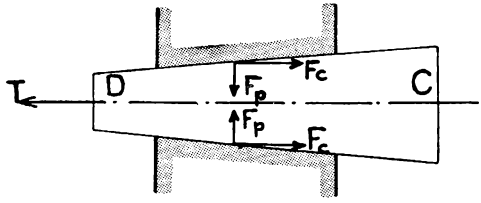


Fig. 6. — Efforts sur broche symétrique.

c) *Forme générale d'une broche.*

Une broche comprend :

— une partie active comportant les dents,

— un entraîneur permettant de l'atteler à la machine,

— parfois, des surfaces de guidage.

Chaque dent est affûtée comme un outil de rabotage ou une dent de fraise. L'épaisseur à tailler par chaque dent, e, est prise légèrement plus forte que celle du copeau taillé minimum.

Si E est la surépaisseur d'usinage, le nombre de dents étagées à prévoir est $n = \frac{E}{e}$.

On y ajoute quelques dents supplémentaires pour permettre les réaffûtages sans perdre la cote de calibrage ; pour cela, les arêtes coupantes de ces dents sont toutes à la même distance de la surface de guidage, ou de l'axe s'il s'agit d'une broche à denture symétrique.

Le pas est la distance entre deux dents consécutives ; il se détermine d'après les considérations suivantes :

a) le copeau produit doit pouvoir se loger entre deux dents,

b) l'effort exercé sur la broche ne doit pas dépasser l'effort maximum que la machine peut fournir,

c) l'effort à exercer sur la broche ne doit pas déterminer une contrainte exagérée dans les organes de traction, ni dans la broche.

Si l'on désigne par e l'épaisseur du copeau produit par chaque dent (en mm), l la largeur de la pièce en mm, K la résistance spécifique à la coupe en N/mm², n le nombre de dents en prise simultanément, T l'effort en Newton à exercer sur la broche, on a :

$$T = Keln$$

Si l'on connaît T et e, on tire de cette formule la valeur de n :

$$n = \frac{K \cdot e \cdot l}{T}$$

Rappelons que l'on peut prendre pour K les valeurs suivantes :

Acier demi-dur ..... 3 000 à 3 500 N/mm²
Fonte ..... 1 500 à 2 000 N/mm²

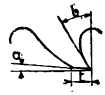
Il faut vérifier la résistance de l'entraîneur à la traction :

$$R_e = \frac{F}{S}$$

R_e étant la contrainte admissible et S la section de l'entraîneur. Quand la broche est poussée, il faut vérifier sa résistance au flambage.

d) *Forme de la denture.*

La dent d'une broche a sensiblement la forme d'une dent de fraise. Le tableau ci-dessous en donne les caractéristiques principales :

Dents	Caractéristiques	Fonte	Aciers doux	Aciers durs
	*b* : pente ..... (°) *a* : dépouille ..... (°) *t* : témoin .... (mm)	6 à 10 2 à 5 0,3 à 0,5	15 à 18 2 à 5 0,7 à 1	12 à 15 2 à 5 0,5 à 0,7

Les arêtes tranchantes sont, le plus souvent, normales au vecteur vitesse, mais elles peuvent être obliques. Dans ce cas (*fig.* 7), un guidage latéral de la broche ou du support de broche est indispensable. L'angle d'inclinaison α a pour valeur :

20° dans la fonte 30° dans les aciers.

Lorsque la largeur de la broche est importante, on pratique des encoches « brise-copeau » dans le taillant. Celà réduit l'effort de coupe et facilite le dégagement des copeaux.

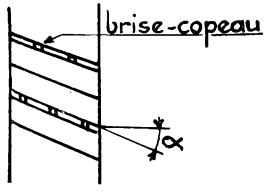


Fig. 7. — Brise-copeau.

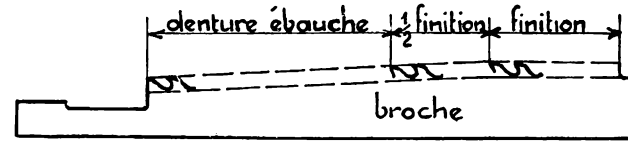


Fig. 8. — Denture d'une broche.

e) *Disposition des dents* (fig. 8).

Une broche réalise consécutivement les opérations d'ébauche, de demi-finition et de finition. Les premières dents d'une broche sont prévues pour tailler des copeaux importants : ce sont des outils d'ébauche. Les 5 ou 6 dents suivantes taillent un copeau plus mince : ce sont les outils de demi-finition. Enfin, les dernières dents qui ne doivent produire, en principe, aucun copeau, ont simplement pour objet le calibrage de la pièce et la possibilité des réaffûtages.

f) *Conditions de travail.*

Les vitesses de coupe généralement adoptées sont les suivantes :

1 à 2 m/mn pour aciers alliés et fontes dures,

2 à 4 m/mn pour aciers au carbone et fontes douces,

4 à 6 m/mn et plus pour les bronzes et alliages légers.

La lubrification doit être abondante, car il faut limiter l'usure, autant qu'il est possible, les réaffûtages étant délicats (ils exigent des machines spéciales ou le retour des broches chez le constructeur) :

Laitons et bronzes : huile soluble,
Fontes : huile soluble ou pétrole,
Aciers : huile de coupe contenant du soufre.

Surfaces usinées.

A. — Surfaces extérieures.

La broche étant un outil de forme, et son déplacement étant rectiligne, on peut, en principe, usiner toutes les surfaces réglées. En pratique, on usine surtout des plans et des rainures à faces planes.

Il y a deux méthodes :

a) *Utilisation d'une broche à coupe frontale* (voir fig. 9).

Les dents de la broche attaquent la pièce sur toute la largeur : c'est la broche précédemment décrite. On la fixe sur le coulisseau de la machine. La largeur de la broche est

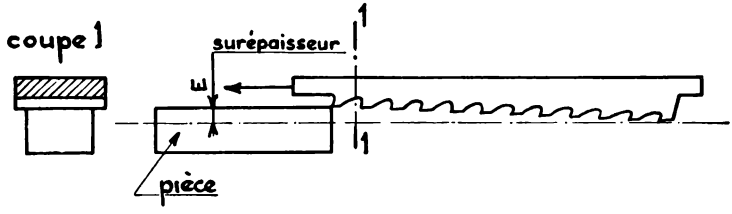


Fig. 9. — Principe du brochage extérieur.

légèrement supérieure à la largeur de la pièce. Cette broche convient pour les pièces dont la surépaisseur d'usinage est toujours la même, car ainsi la première dent a toujours la même épaisseur de copeau à tailler.

b) *Utilisation d'une broche à coupe latérale.*

Lorsqu'on doit usiner des pièces coulées dont la surépaisseur n'est pas constante on risque d'imposer à la première dent un copeau excessif pouvant entraîner sa rup-

ture ; l'effort de traction de la machine peut en outre être dépassé. Aussi, on préfère attaquer de champ la surépaisseur d'usinage au moyen de deux broches dont les parties actives font entre elles un angle (voir *fig.* 10). L'usinage ainsi ébauché est parachevé à l'aide d'une broche frontale.

On fixe ces différentes broches sur une semelle montée sur le coulisseau de la machine

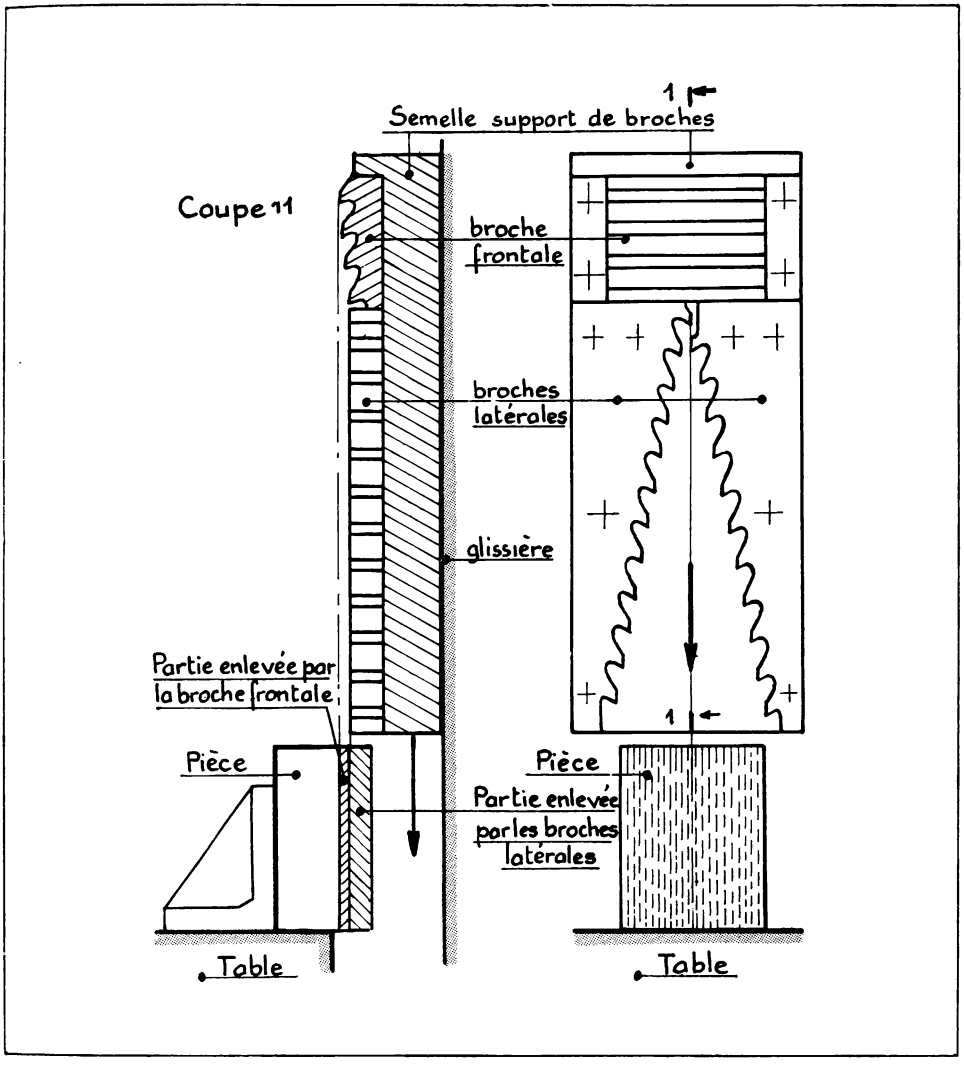


Fig. 10. — Broches latérales et frontales associées.

B. — Surfaces intérieures.

Le brochage est particulièrement intéressant pour exécuter en grande série des trous de section polygonale, des rainures de clavettes dans des alésages, des moyeux pour arbres cannelés, et même pour calibrer les alésages.

La broche comprend les différentes parties définies pour les broches d'extérieur. Comme elles travaillent sur tout leur pourtour, les composantes de l'effort de coupe

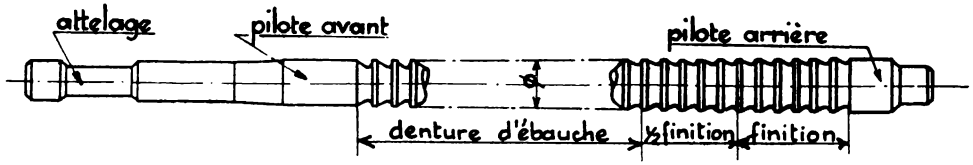


Fig. 11. — Broche de traction ronde.

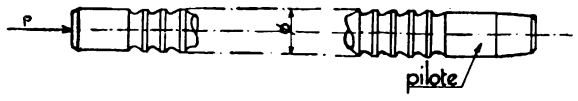


Fig. 12. — Broche de poussée.

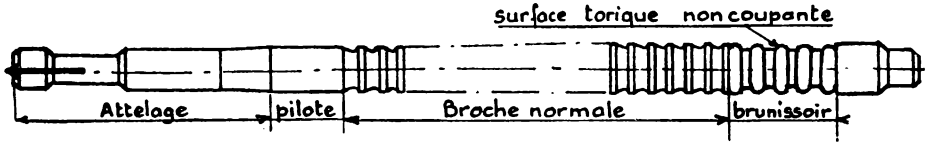


Fig. 13. — Broche de traction avec brunissoir.

normales à l'axe s'équilibrent : un seul effort axial suffit. Les *figures* 11 à 13 représentent une série de broches destinées à l'exécution des alésages.

La *figure* 11 représente une broche tirée et la *figure* 12 une broche poussée, encore appelée mandrin. Cette broche ne nécessite pas l'emploi d'une machine à brocher : une simple presse hydraulique (ou à vis) suffit. Ces broches ne doivent enlever que peu de métal ou alors il faut en passer 2 ou 3 les unes à la suite des autres.

La *figure* 13 représente une broche destinée à aléser et brunir. Les brunissoirs sont des outils de forme arrondie dont le diamètre est très légèrement supérieur à celui de la dernière dent. Leur fonction consiste à lisser le trou par écrouissage du métal ; la surface en devient alors plus dure et plus résistante à l'usure.

C. — Exécution des surfaces associées extérieures.

a) Pour exécuter des surfaces associées extérieures on groupe sur une même semelle usinée différentes broches disposées de manière à réaliser le profil

désiré. *La figure* 14 représente une application de ce principe à l'usinage de chapeaux de bielles d'automobile : on a disposé deux broches latérales et deux broches frontales.

b) Lorsque l'effort de traction nécessaire pour tirer ces différentes broches est supérieur à celui que peut fournir la machine, on exécute le travail en plusieurs

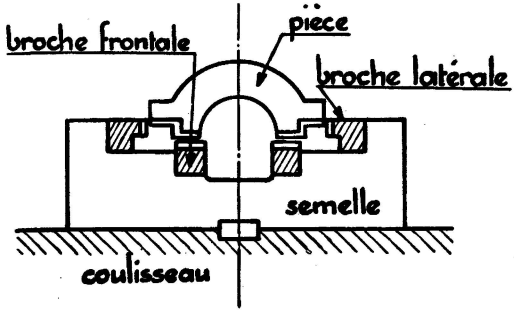


Fig. 14. — Brochage d'un chapeau de palier.

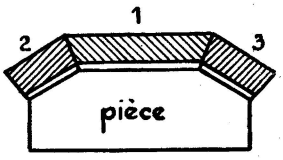


Fig. 15. — Brochage d'extérieur.

opérations. On procède de même lorsque l'assemblage des différentes broches sur la semelle est trop compliqué (voir *fig.* 15). On s'efforce, dans ce cas, de laisser la pièce liée à son porte-pièce. Celui-ci est verrouillé successivement sur les différentes machines prévues pour exécuter le travail.

c) Quand les surfaces associées sont de petites dimensions, on exécute une broche parallélépipédique taillée sur plusieurs faces : c'est, par exemple, le cas des broches destinées à la taille des rainures (voir rainurage).

Précision réalisable.

Le brochage est un procédé d'usinage qui permet une grande précision. L'état de surface peut être réalisé avec des défauts dont la profondeur est de l'ordre de 5 microns.

Pour les surfaces associées, on peut exécuter sans retouche des pièces dans la qualité 6. et parfois même 5, quand la broche est finement affûtée.

Formes à donner aux pièces destinées à être brochées.

Les principes qui vont être énoncés sont évidents :

a) *Condition de possibilité.*

On ne peut brocher une ou plusieurs surfaces associées que s'il est possible de concevoir et d'exécuter une broche capable de résister aux efforts de traction. Ainsi, il n'est pas possible de brocher un trou carré de 10 mm dans une plaque de 40 mm percée à 10 mm, parce que le tracé de la broche conduirait à prévoir un outil qui ne résisterait pas aux efforts de coupe.

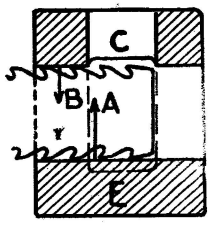


Fig. 16. — Brochage d'un trou chambré.

b) *Condition de bon fonctionnement.*

La broche étant un outil très cher, d'affûtage long et délicat, il faut s'efforcer d'augmenter le plus possible sa durée ; pour cela :

— les efforts qui s'exercent sur les dents ne doivent jamais être exagérés,

— les efforts appliqués sur la broche doivent être équilibrés pour éviter la flexion de l'outil.

Sur la *figure* 16, on peut remarquer que, lorsque la broche passera devant le trou, l'effort normal en A ne sera pas équilibré en C. Il est donc recommandé, si cela est possible, de prévoir un chambrage sur tout le pourtour (tracé en pointillé).

Une dent de broche doit, pendant toute la course, travailler sur toute sa largeur. L'usure sera ainsi répartie uniformément.

Sur la *figure* 17, on remarque que le brochage de la face X conduirait, au droit de la rainure E, à un travail dissymétrique de la broche. Il est préférable de prévoir, au droit de E, le dégagement tracé également en pointillé.

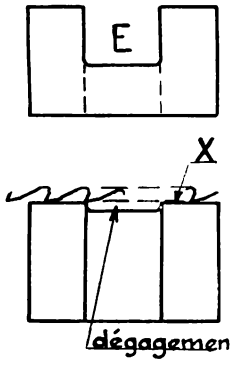


Fig. 17. — Forme d'une pièce brochée avec évidement.

LES MACHINES A BROCHER

Les machines à brocher sont relativement simples parce qu'on n'a aucun mouvement d'avance à produire.

Elles comprennent (*fig.* 18).

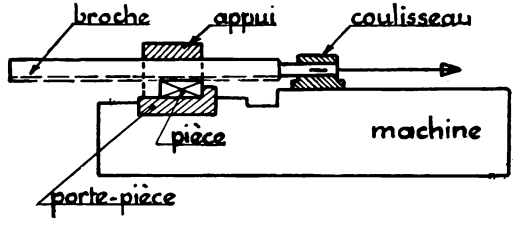


Fig. 18. — Brochage d'extérieur avec porte-pièce et appui.

— un porte-pièce, constitué par une table robuste sur laquelle on fixe et on oriente convenablement la pièce. Le plus souvent, puisqu'on utilise le brochage pour des travaux de série, la mise en position et l'orientation sont assurées par l'intermédiaire d'un porte-pièce de brochage, fixé sur la table.

— un support d'outil, comportant :

le dispositif d'amarrage : le coulisseau,
les organes de support et de guidage de la broche pendant son déplacement.

— le guidage de la broche et de son support :

a) au droit de la zone d'action, afin d'équilibrer les efforts de coupe normaux

au vecteur translation : l'appui. Le support de pièce peut être utilisé à cet effet, mais, lorsque les efforts normaux sont équilibrés (brochage intérieur ou symétrique), la pièce usinée sert elle-même de guide (*fig* 19).

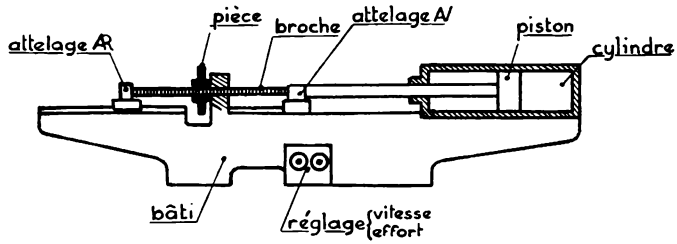


Fig. 19. — Machine à brocher horizontale hydraulique.

b) au droit du dispositif d'amarrage, pour assurer un déplacement parfaitement rectiligne : guides du coulisseau.

— des organes produisant le mouvement de coupe.

Dans les machines de petites dimensions, le coulisseau portant le dispositif d'amarrage est déplacé par un système vis-écrou. Dans les machines importantes, le coulisseau est lié à la tige d'un piston qui se meut dans un cylindre recevant de l'huile mise en pression au moyen d'une pompe. Les *machines horizontales* conviennent bien pour les brochages intérieurs (*fig.* 19) ; les *machines verticales* sont mieux adaptées au brochage d'extérieur (voir *fig.* 20). Les machines à grand débit, pouvant fournir plusieurs centaines de pièces à l'heure, comportent deux coulisseaux : l'un monte pendant que l'autre descend (course active). L'ouvrier charge alternativement les deux postes ; l'éjection de la pièce est parfois automatique.

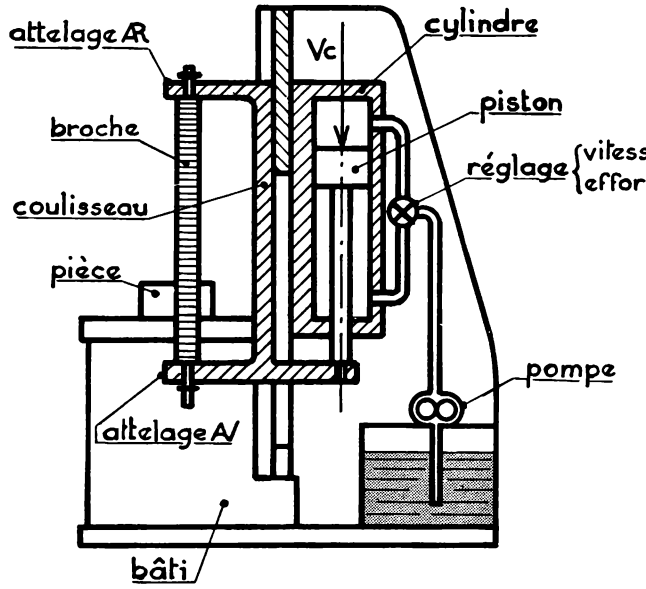


Fig. 20. — Machine à brocher verticale hydraulique.

4. — TRAVAUX DE RAINURAGE

Les rainures sont des sillons, rectilignes ou circulaires. Elles servent souvent de guidage ou de logement pour des organes divers : boulons, clavettes, vis, lardons de dégauchissage, etc. ; dans ce cas, leur section est généralement de forme simple : rectangulaire ou en T (voir *fig.* 1 et 2), mais elles peuvent être également de section semi-circulaire, semi-elliptique ou polygonale (*fig.* 3).

Dans tous les cas, elles sont faciles à réaliser par l'un des procédés déjà étudiés. Nous

Fig. 1. — Rainure rectangulaire. — *Fig.* 2. — Rainure en T. — *Fig.* 3. — Rainures demi-circulaire, semi-elliptique, polygonale.

examinerons plus particulièrement la taille des rainures à l'intérieur d'un cylindre : ces rainures ont de nombreuses applications dans les assemblages d'organes et dans les outils de découpage.

RAINURAGES EXTÉRIEURS

Rainures à section carrée ou rectangulaire.

Ces rainures peuvent être exécutées :

a) par rabotage : à l'étau-limeur, si elles sont de faible longueur, à la raboteuse, si elles sont longues ;

b) par fraisage, si elles sont de moyenne longueur ;

c) par brochage si elles sont courtes.

a) *Usinage par rabotage.*

On utilise l'outil à saigner ; le fond de la rainure est plan et lisse, mais les côtés sont rayés. Si l'on veut des côtés lisses, il faudra compléter l'usinage en employant, en finition, des planes latérales.

Lorsqu'on veut obtenir de nombreuses rainures, on a intérêt à utiliser un outil à saigner à profil constant, qui peut être réaffûté sans faire varier la largeur de la rainure.

b) ***Usinage par fraisage.***

1° Sur fraiseuse horizontale, on utilise les fraises suivantes à trou lisse (*fig.* 4) :

— fraise à une taille à rainurer : elle conserve sa largeur après réaffûtage, mais elle frotte sur les côtés, ce qui diminue son rendement, et les parois de la rainure ne sont pas lisses ;

— fraise à trois tailles à défoncer : le métal est bien coupé, l'aspect des parois est meilleur, mais la largeur de la rainure diminue après chaque affûtage ;

— fraise à trois tailles, expansible, en deux pièces, dont on peut régler la largeur après réaffûtage de façon à conserver à la rainure sa qualité 7 ; on place des clinquants entre les deux éléments de la fraise ;

— fraise à trois tailles, à profil constant et à denture détalonnée : c'est la meilleure si elle est convenablement exécutée de manière à lui donner de la dépouille latérale.

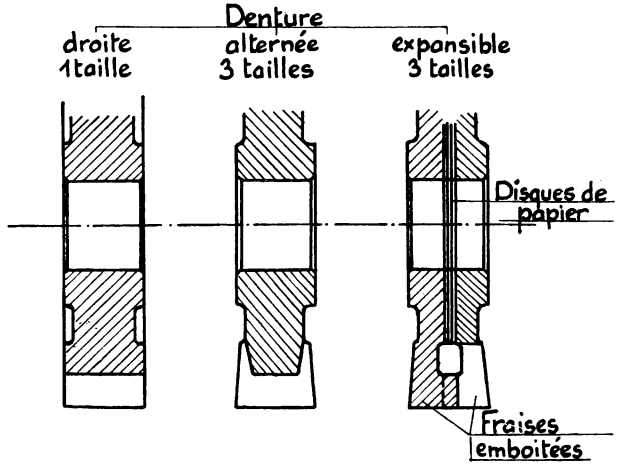


Fig. 4. — Fraises à rainurer, à trou lisse, à denture fraisée.

2° Sur fraiseuse verticale, on utilise :

— les fraises à deux tailles (droites ou hélicoïdales (*fig.* 5). Elles ont tendance à engager et à produire une rainure de cote supérieure à celle de leur diamètre, qui varie d'ailleurs au cours des réaffûtages. La rainure peut être exécutée en une seule passe, mais, en général, on prend une fraise plus petite et on fait deux passes.

— les fraises à deux lèvres (analogues à des forets hélicoïdaux dont on aurait supprimé la pointe). Elles ont le diamètre de la rainure à produire : ce diamètre ne varie pas au cours des réaffûtages, car on ne meule qu'en bout. Avec ces

fraises, on ne prend que quelques dixièmes de mm de profondeur de passe : l'opération est longue. On trouve maintenant sur le marché des fraiseuses spéciales pour tailler les rainures ; ces machines sont automatiques ; elles procèdent par passes successives faites à grande vitesse. Le travail est rapide, et la machine s'arrête quand il est achevé.

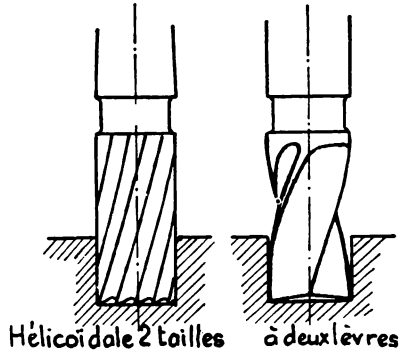


Fig. 5. — Fraise à queue conique ou cylindrique.

c) *Usinage par brochage.*

On obtient une rainure précise en employant une broche frontale à une taille. Les faces latérales ont bon aspect et la précision est excellente. Lorsque la rainure est assez large, on utilise une broche à trois tailles qui donne un bien meilleur état de surface sur les trois côtés de la rainure.

Rainures à section en T.

Ce sont souvent des rainures de tables de machines-outils, ou des rainures de porte-pièces et d'étaux. Dans le premier cas, la raboteuse s'impose, tandis que la fraiseuse est préférable dans le second, sauf si l'on envisage le rabotage en ligne de toute une série de pièces.

a) *Usinage à la raboteuse.*

On taille d'abord une rainure simple, puis on élargit le premier côté et enfin le second, avec des outils spéciaux (*fig.* 6 et 7). Il faut que l'outil ait pour largeur B < A. Généralement, on n'obtient pas E avec un seul outil ; il en faut un second dont la cote D soit plus petite que C. De tels

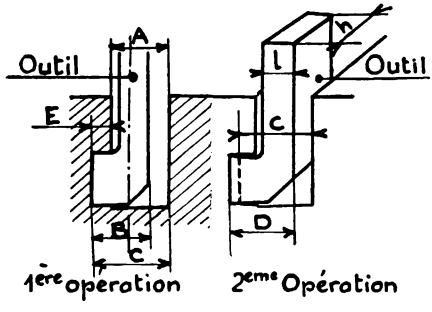


Fig. 6 et 7. — Exécution d'une rainure en T par rabotage.

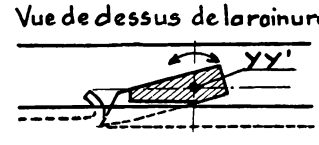


Fig. 9. — Outil de rabotage articulé pour éviter le frottement pendant le retour.

outils ont forcément une faible largeur 1 ; l'autre dimension doit donc être importante pour assurer une rigidité suffisante.

Pendant la course de retour, l'outil frotte sur les parois usinées. Il y a donc lieu de concevoir un dispositif de relevage qui dégage complètement l'outil en l'amenant au-dessus du plan supérieur de la pièce. Très souvent ce relevage est manuel.

Pour les travaux de série ; on peut combiner un porte-outil articulé autour d'un axe vertical YY′ pour que l'arête ne frotte pas pendant le retour (*fig.* 9, page 96).

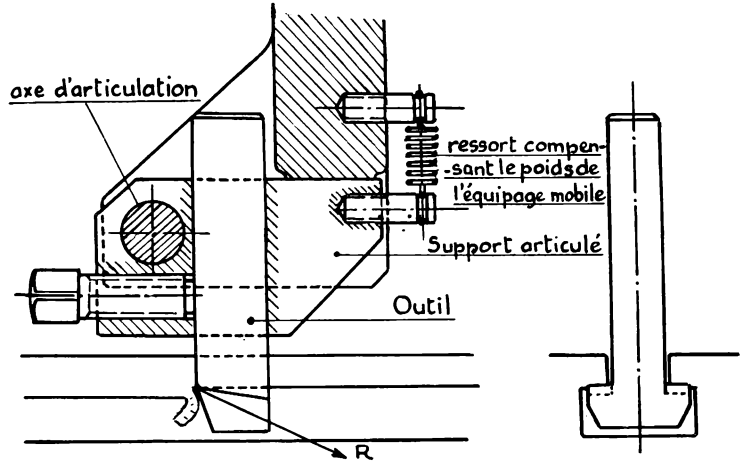


Fig. 8. — Outil articulé pour rainure en T.

Si l'on désire une bonne face d'appui pour les boulons, il faut la terminer par planage plane montée sur un porte-outil articulé (*fig.* 8).

b) *Usinage à la fraiseuse.*

On exécute d'abord la rainure simple, puis on termine avec une fraise en T. On exécute d'abord un côté, puis le second ; le diamètre de la fraise doit être inférieur à la largeur de la rainure, et celui de son entraîneur doit être plus petit que la largeur de la rainure simple.

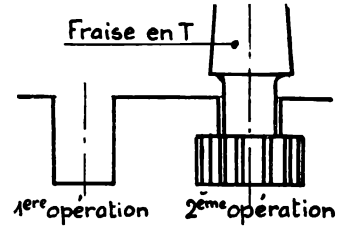


Fig. 10. — Fraisage d'une rainure en T.

c) *Usinage par brochage.*

On pourrait évidemment brocher d'abord la rainure simple, puis, en deuxième opération, brocher les faces internes. Ce procédé ne convient que pour les rainures courtes et de grande section.

Rainures de section complexe.

— ***Rainure en vé*** (*fig.* 11).

Fig. 11. — Rainure en V.

Les mêmes techniques peuvent être prévues en utilisant :

— un outil de rabotage de forme (ébauche en deux fois) ;
— une fraise de forme, en une opération ;
— une broche d'extérieur, en une fois.

— ***Rainure étagée*** (*fig.* 12).

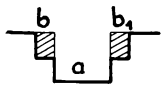


Fig. 12. — Rainure étagée : opérations d'usinage.

Sur une machine à raboter, l'usinage comporte trois opérations :

1° exécution de la rainure *a*,
2° exécution de *b*,
3° exécution de b_1.

Sur fraiseuse, on utilise une fraise de forme ou un train de fraises : une seule opération suffit.

Sur machine à brocher, on utilise une broche de forme : c'est un brochage extérieur.

— ***Profil « sapin ».***

C'est le profil (représenté approximativement ci-contre) utilisé dans l'assemblage des ailettes de turbines et de turboréacteurs sur leur rotor. Il est conçu pour équilibrer l'action centrifuge, développée sur les ailettes, qui est extrêmement élevée. On l'usine :

a) *par rabotage.*

Le rotor étant peu épais, le travail pourrait être exécuté en plusieurs opérations sur une machine à mortaiser. Il faudrait un ou plusieurs outils de forme, fragiles et d'affûtage délicat. Ce mode de travail n'est pas recommandé.

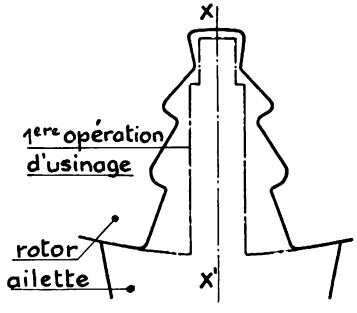


Fig. 13. — Profil sapin destiné à l'assemblage des ailettes sur un rotor de turbine à gaz.

b) *sur fraiseuse.*

Il nécessiterait une fraise de forme dont le profil serait celui de la rainure, et l'axe de rotation XX' (*fig.* 13). Cet outil, délicat, aurait un rendement faible. Ce procédé ne peut être retenu.

c) *par brochage.*

Ce procédé permet de résoudre élégamment le problème. On encoche d'abord les rainures simples, puis on forme le profil sapin. Le rotor est monté sur un diviseur à main qui est installé sur une machine à brocher à deux broches (*fig.* 14). On exécute d'abord toutes les rainures simples, puis on déplace le diviseur d'une longueur rigoureusement égale à E, et l'on termine le profil.

Ces quelques exemples montrent les ressources du rabotage, du fraisage et du brochage. En général, le procédé à retenir s'impose de lui-même en raison des dimensions, de la forme des rainures, de la précision à obtenir et du nombre de pièces à usiner.

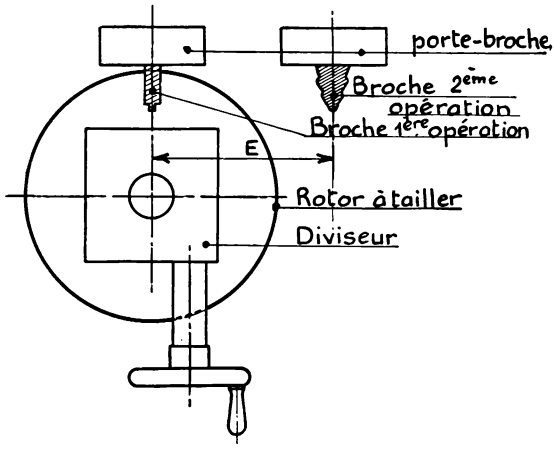


Fig. 14. — Usinage du profil sapin par brochage.

Dans le cas où l'on aurait quelque hésitation, l'étude du prix de revient permet de prendre une décision.

Rainures droites ou hélicoïdales sur cylindre.

C'est évidemment la fraiseuse qui convient le mieux pour l'exécution des rainures droites et hélicoïdales (*fig.* 15), grâce à l'adjonction du diviseur. L'outil est une fraise de forme. On a donc intérêt à prévoir une section de rainure correspondant aux fraises qui existent dans les ateliers. Pour les séries importantes, la fraiseuse est équipée d'un diviseur automatique.

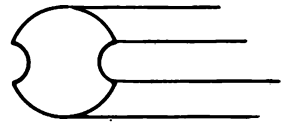


Fig. 15. — Rainures sur cylindre.

Lorsqu'on doit exécuter un petit nombre de rainures de section particulière, la fabrication d'une fraise de forme étant trop longue et trop coûteuse, on peut, dans certains cas, faire le travail sur une machine à mortaiser. Il importe alors que la rainure débouche aux extrémités du cylindre. Inversement, si l'on a de très grandes séries à réaliser, on peut envisager la machine à brocher (voir *fig.* 28) : le travail est plus rapidement fait, surtout si l'on utilise un porte-pièce à division automatique ; la division est commandée par le coulisseau porte-broche pendant sa course de retour.

Rainures taillées en bout : griffes d'embrayage.

On usine souvent de telles pièces. En prenant quelques précautions dans leur tracé, on peut réaliser très vite ces entailles en employant un diviseur à axe vertical. Les

figures 16 et 17 représentent une pièce qui comporte cinq encoches pouvant être exécutées par cinq passages de la fraise : chaque passage intéresse deux encoches.

Rainures en contour fermé.

Ces rainures constituent un élément de l'assemblage des pièces dont les surfaces de

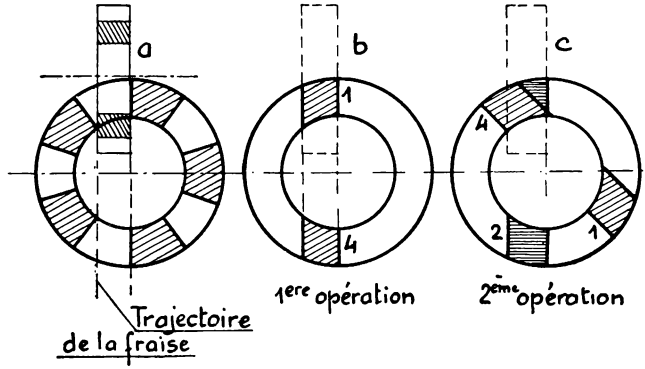


Fig. 16 et 17. — Usinage de rainures en bout : *a* forme des rainures ; *b* et *c* opérations d'usinage.

contact sont cylindriques. Elles comprennent notamment les rainures de clavette, les moyeux d'arbres cannelés, les rainures de graissage, etc.

L'usinage peut être réalisé :

a) *Par rabotage.*

La mortaiseuse a été conçue pour exécuter ce travail. Selon la forme de l'outil, on peut obtenir des rainures variées ; en employant le plateau circulaire, on peut façonner des alésages cannelés (*fig.* 18 et 19).

On peut usiner toutes sortes de rainures (*fig.* 22) réparties de façon quelconque à l'intérieur d'un contour lui-même quelconque. On usine ainsi les matrices de découpage

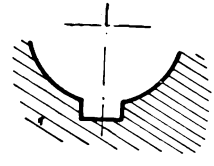


Fig. 18. — Rainure de clavette.

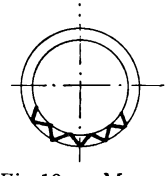


Fig. 19. — Moyeu à cannelures d'angle.

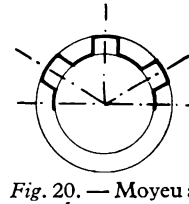


Fig. 20. — Moyeu à cannelures rectangulaires.

Fig. 21. — Forme de l'outil de mortaisage.

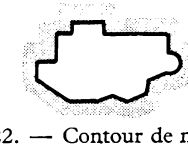


Fig. 22. — Contour de matrice de découpage à obtenir par mortaisage.

d'après leur tracé. Le coulisseau des mortaiseuses peut être incliné légèrement par rapport à la verticale : on peut ainsi obtenir la dépouille des matrices (*fig.* 23).

b) *Par fraisage.*

On ne peut, en principe, utiliser une fraise pour exécuter des rainures de clavetage. Mais, si l'alésage est de grande dimension, et s'il est long, il est possible de tailler

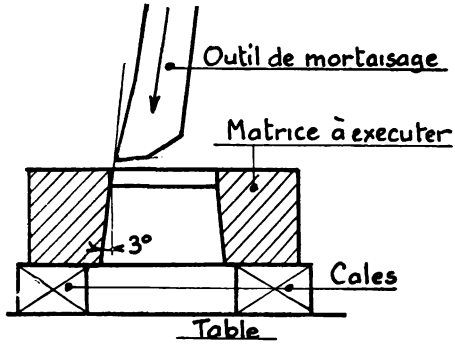


Fig. 23. — Exécution de la dépouille d'une matrice à la mortaiseuse.

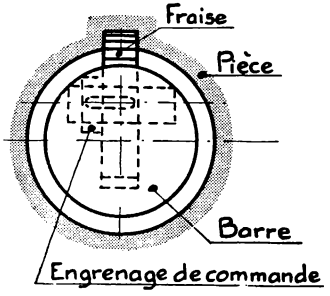


Fig. 24. — Fraisage d'une rainure dans une pièce de grand alésage.

la rainure avec une fraise portée par une longue barre qui porte les organes animant l'outil. Si l'on donne à la barre un mouvement de rotation combiné au mouvement d'avance, on obtient une rainure hélicoïdale (rayures des bouches à feu) (*fig.* 24).

c) *Par brochage.*

En fabrication de série, le brochage est la meilleure solution. La normalisation a permis aux usines de s'équiper de broches coûteuses, certes, mais dont l'emploi est fréquent. Les broches tirées permettent d'exécuter très correctement le travail. Elles se montent, en général, sur les machines à brocher horizontales.

Lorsque les rainures sont peu profondes, il y a donc peu de métal à enlever, et il est possible d'utiliser des broches courtes poussées (*fig.* 25). C'est l'opération de mandrinage, qui peut être exécutée sur machine à brocher verticale ou sur une presse hydraulique.

Lorsqu'on doit exécuter une seule rainure dans un alésage, la broche ne taillant que sur un côté doit être équilibrée et guidée (*fig.* 26). Dans des cas particuliers, il est possible d'utiliser cette broche et son guide pour réaliser une série de rainures intérieures. Il suffit de maintenir

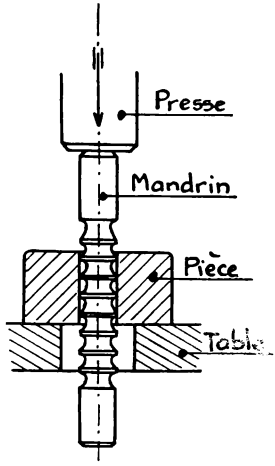


Fig. 25. — Mandrinage de trou polygonal.

fixe le guide, et de faire tourner la pièce. Cela revient moins cher que de faire exécuter une broche à plusieurs baguettes.

Il existe des broches simples qui permettent de réaliser des cannelures dans un alésage exécuté avec soin.

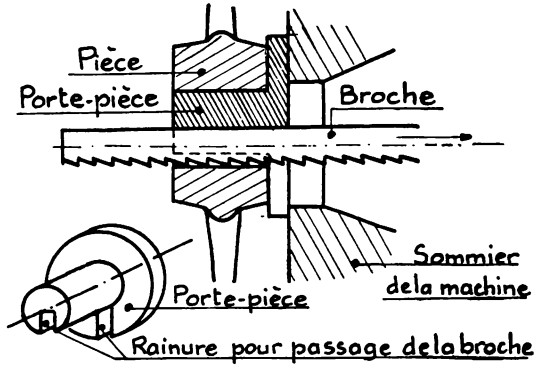


Fig. 26. — Brochage d'une rainure de clavette.

Mais on construit aussi des broches permettant de réaliser deux opérations successives : l'alésage du trou et les cannelures (*fig.* 27).

Enfin, il est possible d'obtenir des cannelures hélicoïdales. On utilise pour cela des broches taillées en hélice et rectifiées au profil correspondant à l'angle d'hélice choisi. Elles sont entraînées dans un mouvement de rotation, sur la machine à brocher, grâce à un guide lui-même hélicoïdal (*fig.* 28).

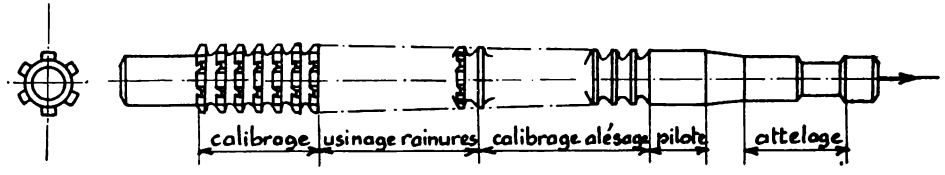


Fig. 27. — Broche pour usinage des rainures dans les alésages destinés à recevoir des arbres cannelés.

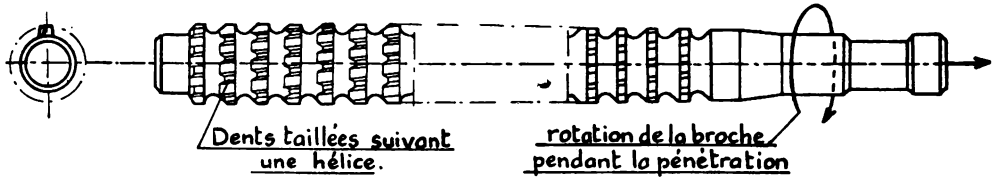


Fig. 28. — Broche pour l'exécution de rainures hélicoïdales dans un alésage.

Exécution des surfaces de révolution, surfaces intérieures cylindriques

Étude d'ensemble du problème à résoudre :

Les pièces mécaniques comportent presque toutes des surfaces cylindriques intérieures. Elles sont réalisées :

— soit directement en pleine matière,

— soit en partant d'une ébauche préalablement obtenue par usinage (perçage), ou venue de forge ou de fonderie.

On réalise généralement une surface cylindrique intérieure en *pleine matière* avec un *foret* : l'opération s'appelle *perçage* (*fig.* 1A). Dans quelques cas particuliers on peut utiliser un *trépan*, outil qui découpe une rondelle de métal (*fig.* 1B).

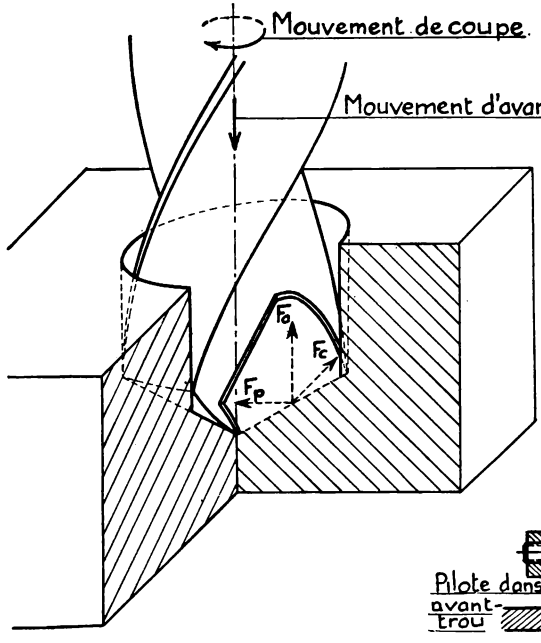


Fig. 1 A. — Mode d'action d'un fore hélicoïdal.

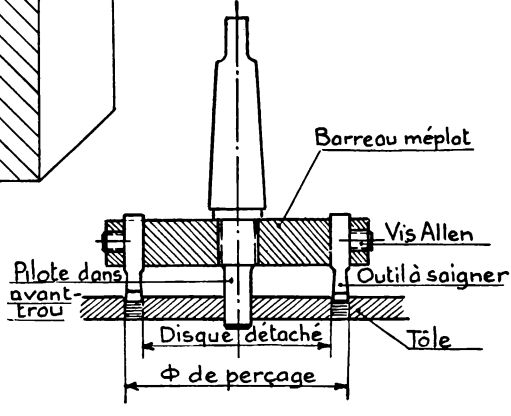


Fig. 1 B. — Mode d'action d'un trépan.

L'usinage en finition d'une surface cylindrique intérieure à partir d'un trou déjà obtenu par perçage, forge ou fonderie, porte le nom d'*alésage*. On emploie un *foret* de plus grand diamètre, un *outil d'enveloppe* (outil monté sur une barre d'alésage ou outil à aléser monobloc) ou un *outil de forme :* l'alésoir.

Le perçage est une opération d'ébauche ou de finition selon la précision exigée.

L'alésage est, le plus souvent, une opération de finition de précision élevée.

1. — LE PERÇAGE

Sur l'ensemble des pièces constituant une voiture automobile, on compte environ 2 000 trous... L'opération de perçage est donc très fréquente ; elle paraît simple mais elle peut être coûteuse si elle est longue ou si les outils durent peu. Elle peut réserver de sérieux déboires quand il s'agit de trous longs.

Caractéristiques des trous à obtenir.

Diamètres.

Ils varient de quelques dixièmes de millimètre à 50 mm et parfois plus. En général la précision exigée est faible : trous pour vis et boulons, trous pour passage de tiges (avec beaucoup de jeu), trous destinés à être taraudés ou alésés, trous d'allègement...

Longueur.

Elle varie de quelques millimètres à 8, 10 ou 15 fois le diamètre. Il n'y a pas de réelle difficulté tant que $l < 3$ à $4\ d$.

Emplacement.

Ils sont généralement déterminés avec précision pour que les opérations d'assemblage soient faciles et pour assurer une répartition correcte de la surépaisseur réservée à la finition ; la tolérance sur les entraxes n'est souvent que de quelques centièmes de millimètres.

Position géométrique.

On recherche souvent le parallélisme des axes ou leur orthogonalité. Si les machines sont précises, on obtient facilement ces résultats mais le problème est plus délicat quand on désire une position angulaire déterminée.

Le trou brut de perçage a toujours un diamètre supérieur à celui de l'outil ; cela tient aux défauts d'affûtage et aux arrachements dus au foret qui varient d'ailleurs avec la nature du métal percé.

ÉTUDE DE L'OUTIL DE PERÇAGE

Description.

L'outil usuel est le foret hélicoïdal (*fig.* 2), outil à profil constant, à pente d'affûtage invariable (angle de la rainure hélicoïdale). La dépouille, par contre, est obtenue par meulage et peut être modifiée.

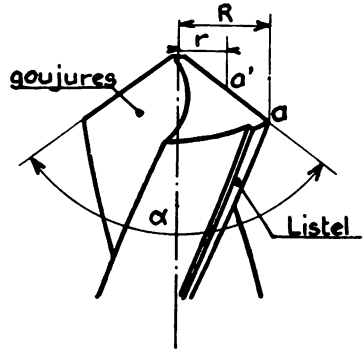


Fig. 2. — Dessin d'un foret hélicoïdal.

Les forets ont, le plus souvent, deux lèvres de guidage, ou « listeaux » qui centrent l'outil dans le trou pendant le perçage. On mesure le diamètre du foret sur ces listeaux rectifiés par le fabricant ; ce diamètre est légèrement plus fort près de la pointe (conicité 0,01 %) pour éviter le coincement de l'outil dans le trou (dépouille). Le foret est calibré H8.

Les rainures hélicoïdales (goujures) doivent être lisses afin que les copeaux y glissent plus facilement. Ces rainures sont généralement fraisées mais on les taille cependant à la meule pour les petits diamètres (moins de 3 mm). On fabrique aussi des forets en partant de barres laminées dont la section droite a la forme de celle du foret à réaliser ; cette barre est tordue à chaud.

L'entraîneur (queue) est cylindrique pour les forets de diamètre inférieur à 12 mm et conique pour les autres (cône Morse).

Les forets hélicoïdaux sont presque tous fabriqués en acier à coupe rapide ordinaire ou supérieur.

Éléments caractéristiques du foret.

Pente d'affûtage.

On peut assimiler l'angle *b* de l'hélice extérieure à l'angle de pente d'affûtage. Sa valeur est d'environ :

40 à 60° pour le travail des alliages légers,
25° — des aciers,
15° — du magnésium,
0° — des bronzes et laitons.

Angle de pointe.

Les arêtes tranchantes, également inclinées sur l'axe du foret, sont les intersections de chacune des deux surfaces meulées en dépouille avec la surface hélicoïdale des goujures (*fig.* 2).

L'angle des arêtes tranchantes α est l'angle de pointe du foret ; il conditionne la pénétration du foret dans le métal.

Les valeurs admises pour cet angle, à la suite de nombreux essais, sont les suivantes :

40°	pour le travail	de l'ébonite,
116 à 120°	—	des aciers,
130°	—	de l'alpax,
140°	—	de l'aluminium,
150°	—	du magnésium.

Angle de dépouille.

Il est très difficile à contrôler. On lui donne une valeur de 4 à 6° quelle que soit la matière travaillée.

Affûtage des forets.

On ne peut les affûter correctement que sur des machines spéciales ; il faut proscrire absolument l'affûtage manuel sur un simple touret. L'approvisionnement des postes de production doit être suffisant afin que l'opérateur n'ait jamais la tentation d'affûter lui-même ses forets. On groupe les forets usagés par diamètres et on les affûte en série.

Mode d'action du foret

Action des arêtes tranchantes.

Les arêtes tranchantes agissent comme des outils de coupe ordinaires mais l'angle de pente d'affûtage varie le long de chacune d'elles.

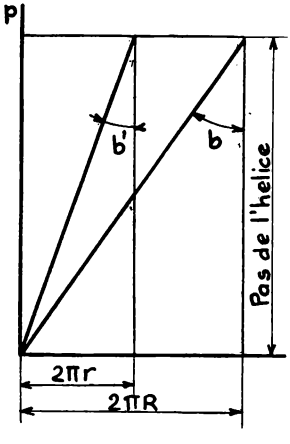


Fig. 3. — Détermination de la pente d'affûtage le long de l'arête tranchante.

Développons un arc d'hélice tracé sur la surface extérieure du foret (*fig.* 3).

On a : $\operatorname{tg} \widehat{b} = \dfrac{2\pi R}{p}$ (p pas de l'hélice).

Si nous considérons une autre hélice tracée sur l'une des goujures à une distance r de l'axe on a :

$$\operatorname{tg} \widehat{b'} = \frac{2\pi r}{p}$$

Le pas p de cette dernière hélice est le même que celui de la précédente puisque la goujure est un hélicoïde à génératrice curviligne.

En comparant les deux relations on voit que $\widehat{b'} < \widehat{b}$. Ainsi la pente d'affûtage diminue de l'extérieur vers l'axe du foret. La coupe n'est vraiment correcte qu'à la distance R et le copeau, près de la pointe, est arraché ; le travail moléculaire est intense et l'échauffement important.

Action de l'arête centrale de pointe.

Au droit de l'arête centrale de pointe nous ne trouvons ni pente d'affûtage, ni dépouille.

Le travail dans cette région est comparable à celui qu'effectue un maçon quand il perce un trou dans la pierre ou la brique avec un « pistolet » ou un tamponnoir ; l'outil travaille comme un matoir. La plus grande partie de l'effort de pénétration du foret est absorbée par la pointe.

Que se passe-t-il sous la pression exercée par le foret dans cette région ? Si la matière est friable (fonte par exemple) la pointe la désagrège, la pulvérise ; si elle est tenace et malléable (acier) elle s'écrouit d'abord fortement et est ensuite refoulée devant les arêtes tranchantes (état pâteux sans doute).

Quand l'âme est épaisse, l'arête de pointe est importante et l'écoulement du métal s'obtient difficilement : localement la température du métal s'élève ; elle peut devenir excessive au point d'entraîner la détrempe du foret. Pour éviter cet accident on réduit la largeur de l'arête terminale par deux coups de meule donnés symétriquement. Pour les gros diamètres on peut même affûter la pointe en lui donnant la forme d'un foret à langue d'aspic mais les lèvres coupantes de ce petit outil sont mal refroidies et, fragiles, se détériorent facilement.

Pour réduire le gros effort de pénétration qui déforme la pièce et surcharge la machine on préfère percer un avant-trou quand les trous à obtenir sont de grands diamètres.

L'étude expérimentale suivante fait mieux comprendre les phénomènes qui se produisent pendant que le foret travaille et permet d'énoncer quelques règles à observer pour percer.

Étude expérimentale des efforts mis en jeu par le perçage.

Première expérimentation.

Une perceuse sensitive est équipée comme l'indique la *figure* 4. L'effort de l'opérateur s'applique au levier par l'intermédiaire d'un dynamomètre de traction D. Si F est constant, l'avance par tour est aussi constante ; un foret de 10 mm supporte facilement une avance de 0,1 ; le foret pénètre facilement.

L'équation des moments par rapport à O donne, à un instant quelconque :

$$Q \times 17 = F \times 280$$

d'où $$Q = \frac{F \times 280}{17} = 16{,}5\ F$$

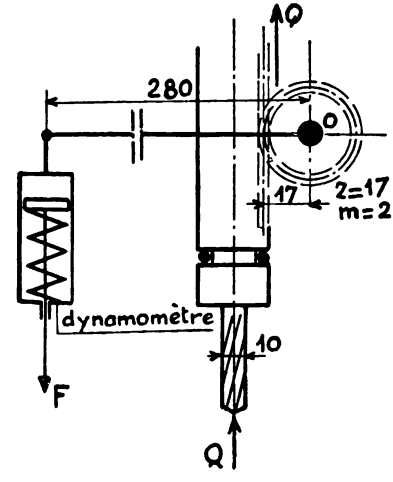


Fig. 4. — Meulage de l'extrémité du foret.

Si l'acier usiné a pour résistance à la rupture (R*r*) $e = 600$ N/mm² on obtient :

1° avec un *foret de* 10 : F = 75 N et Q = 1 150 N (1),

2° avec un *foret de* 3 : F = 15 N et Q = 250 N.

Ce trou 3 peut être un avant-trou facile à percer car la pointe du foret est de très faible largeur et le travail de matage est peu important.

3° Avec le *foret de* 10 en l'engageant dans cet avant-trou :

F = 25 N et Q = 400 N,

4° avec un *foret de* 10 *à âme amincie* perçant directement :

F = 45 N et Q = 720 N,

5° avec un *foret de* 10 à âme amincie et *affûtée :*

F = 40 N et Q = 640 N.

On peut renouveler l'expérience avec un foret plus gros, un autre métal et une autre avance : les résultats restent comparables.

Conclusion :

1° Avec un avant-trou d'un diamètre sensiblement égal à l'épaisseur de l'âme du foret utilisé ensuite (3 pour foret 10) l'effort Q passe de 1 150 N en pleine matière à 400 N avec un avant-trou. La réduction de l'effort de pénétration est donc de l'ordre de 65 % alors que le rapport des poids de copeaux produits est de :

$$\frac{\pi 10^2 - \pi 3^2}{\pi 10^2} = \frac{10^2 - 3^2}{10^2} = \frac{100 - 9}{100} = \frac{91}{100}$$

Les 9/100 du trou exigent un effort supplémentaire de 1 150 — 400 = 750 N.

2° Le perçage d'avant-trous est économique dans les opérations de série. On peut utiliser une perceuse à deux broches : l'une avec un foret de ϕ 3, l'autre avec un foret de ϕ 10 ; on gagne ainsi les temps de démontage et en outre :

— les forets s'usent moins vite,

— les « temps mécaniques » sont comparables,

— l'énergie consommée est réduite.

3° L'amincissement de l'âme et, si possible, son affûtage en langue d'aspic sont recommandables : ils rendent le perçage plus économique.

Deuxième expérimentation.

Couple de perçage :

Machine utilisée : machine à percer sensitive.

On en équipe le moteur avec un wattmètre et un inverseur.

On mesure la puissance W watts fournie par le moteur pendant une opération de perçage.

(1) Pour calculer les efforts dans le système MK,S il suffit de se souvenir que 1 kgf ≃ 10 N Cela conduit, pour avoir le nombre de kgf, à diviser par 10 le nombre de Newtons.

Si ρ_1 est le rendement du moteur,
et ρ_2 le rendement de la chaîne cinématique de la machine,
la puissance W_1 absorbée par le travail de perçage est :

$$W_{1\ \text{watts}} = W \cdot \rho_1 \cdot \rho_2.$$

Si la vitesse angulaire du foret est ω, le couple de forage a pour valeur :

$$C = \frac{W_1}{\omega} \text{ m}\wedge\text{N (mètre vectoriel Newton : système S.I.)}$$

ou $$C = \frac{W_1}{9{,}81\ \omega} \text{ mètres/kilogrammes force (système M.K.}_g\text{S.)}$$

RÉSULTATS :

Perçage avec un foret de 10 ; acier travaillé : $Rr = 600$ N/mm^2,
lubrification abondante : conditions de coupe $V = 19$ m/mn, $a = 0{,}1$ tr/mn

Foret affûté, âme amincie : $C = 3$ m$\wedge$N
— âme amincie : $C = 2{,}5$ m$\wedge$N
— et âme affûtée : $C = 2$ m$\wedge$N

Foret travaillant sur avant-trou de 3 : $C = 1{,}2$ m$\wedge$N.

En multipliant les essais, on s'aperçoit qu'une grande partie du couple de forage correspond au travail de l'âme du foret : l'affûtage de l'âme est une opération rentable en raison de l'économie d'énergie consommée.

On conçoit aisément que l'exécution d'un avant-trou permette :

a) de percer un trou d'un diamètre supérieur à celui correspondant à la capacité de la machine : le moteur est alors suffisant et les organes ne sont pas surmenés,

b) de réduire l'effort de pénétration et d'éviter ainsi la flexion de pièces déformables.

Flexibilité des forets

Un foret se déforme sous l'action des efforts qui lui sont appliqués ; son axe ne reste pas rectiligne : **il est flexible.**

Cette flexibilité est due au rapport de la longueur de l'outil à son diamètre et aux deux cannelures hélicoïdales qui réduisent considérablement la section. **Tout le travail de perçage des petits et moyens trous est conditionné par cette flexibilité.**

Étude expérimentale mettant en évidence cette flexibilité.

Première série d'expériences.

Foret soumis à un effort radial.

La flexibilité des forets sous l'action d'un effort radial peut être mise en évidence au moyen du dispositif expérimental représenté par la *figure* 5.

L'expérience a pour objet :

a) de comparer la flexibilité d'un foret cylindrique à celle d'une tige cylindrique pleine de mêmes dimensions.

RÉSULTAT : les flèches prises par le foret sont environ huit fois plus importantes que celles de la tige pleine ;

b) de montrer que pour un même foret les flèches sont proportionnelles à l'effort ;

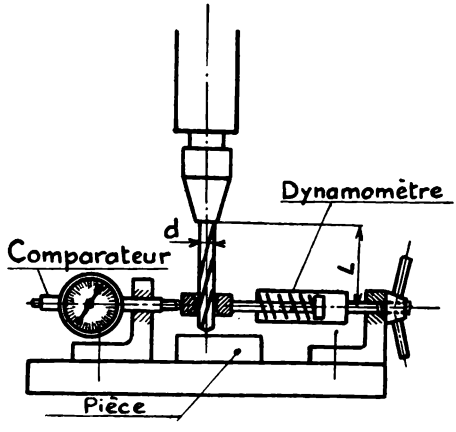


Fig. 5. — Etude expérimentale de la flexibilité d'un foret.

c) de rechercher, pour des forets de même diamètre, la relation existant entre la flèche et la longueur du foret :

— série longue,

— série courte,

— foret diminué par les affûtages successifs,

— foret guidé par un canon de perçage.

RÉSULTAT : les flèches sont sensiblement proportionnelles au cube de la longueur.

d) de comparer la flexibilité des forets de diamètres différents.

On a vu dans le cours de seconde, que les efforts de coupe d'un foret sont proportionnels au diamètre du foret pour une même avance par tour. Il semble donc logique d'appliquer à des forets différents des efforts proportionnels à leurs diamètres et de comparer leurs flèches.

RÉSULTATS :

Les déformations des forets de petit diamètre sont plus importantes que celles des forets de grand diamètre.

Deuxième série d'expériences.

Foret soumis à un effort axial.

Le dispositif expérimental est représenté par la *figure* 6. La connaissance de l'effort axial se déduit aisément de l'action sur le levier de la machine à percer.

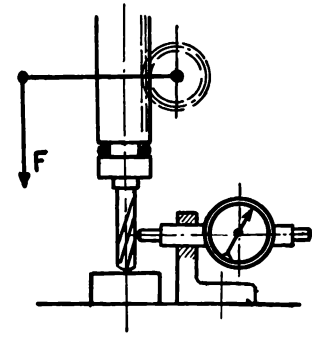


Fig. 6. — Détermination expérimentale de l'effort de pénétration.

Action sur un foret :

a) Effort axial modéré : pas de flèche.

b) On fait croître l'effort l'axial : pour une valeur déterminée de cet effort une

flèche apparaît. Si l'effort varie par faibles accroissements, la flèche prend rapidement de l'importance et la rupture du foret peut se produire. On dit qu'il y a flambage du foret et l'effort qui détermine la flèche est appelé effort critique de flambement.

c) On exerce sur deux forets de même diamètre mais de longueurs différentes, des efforts axiaux. L'expérience montre que les efforts critiques de flambement sont inversement proportionnels aux carrés des longueurs. Un foret court résistera donc mieux aux efforts qu'un foret long.

d) Recherchons maintenant la valeur de l'effort critique de flambement lorsque l'action du métal n'est pas dirigée suivant l'axe du foret.

Reprenons successivement chacun des forets précédents : leur bout sera affûté plan (*fig.* 8). La pièce d'appui ne porte que sur le côté du foret, l'action R de la pièce sur le foret ne passe pas par son axe. Les efforts critiques sont plus petits que ceux qui ont été trouvés au cours de l'expérience précédente. L'excentrement de l'effort exercé par la pièce favorise le flambage du foret.

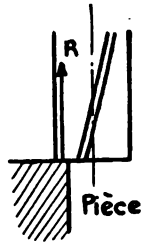


Fig. 7. — Mesure de la flèche de flambement.

CONCLUSIONS.

Si un foret est soumis à un effort radial il fléchit.

Un effort axial trop important provoque le flambage du foret : il y a danger de rupture.

L'excentrement du foret favorise le flambage.

Les forets de petit diamètre sont plus flexibles que les forets de gros diamètre.

Les forets courts se déforment moins que les forets longs.

Les guides de perçage limitent les déformations des forets.

Cette étude doit être complétée : nous devons rechercher la source de l'effort radial appliqué au foret qui travaille, examiner les conséquences de la flexion prise par cet outil et en déduire les règles pratiques pour l'utilisation rationnelle des forets.

Efforts de coupe appliqués aux forets

La résultante des efforts de coupe dus à l'action du métal sur une lèvre du foret, admet trois composantes :

F*a* parallèle à l'axe,

F_p normale à l'axe,

F_c tangente à la circonférence décrite par son point d'application. Les forces F_p et F_c sont situées dans un plan normal à l'axe.

a) Les efforts sur les *deux lèvres* sont égaux deux à deux (*fig.* 9 A).

On a : $F_{1a} = F_{2a}$,

$F_{1p} = F_{2p}$,

$F_{1c} = F_{2c}$.

La résultante $F = 2\,F_a$ des forces F_a est portée par l'axe du foret. Si nous négligeons l'épaisseur de l'âme nous pouvons admettre que les forces F_{1p} et F_{2p} sont égales et directement opposées : elles s'annulent. Les forces F_c constituent un couple de torsion équilibré par le couple d'entraînement.

Il n'existe donc pas d'effort radial susceptible de faire fléchir le foret.

L'égalité des forces sur les deux lèvres est obtenue si les deux arêtes tran-

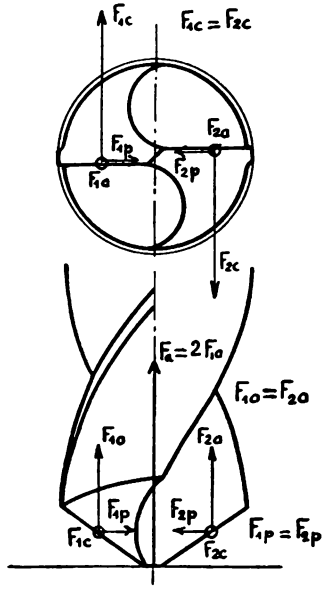


Fig. 9 *A.* — Efforts de la pièce sur un foret lorsque les deux lèvres travaillent de la même façon.

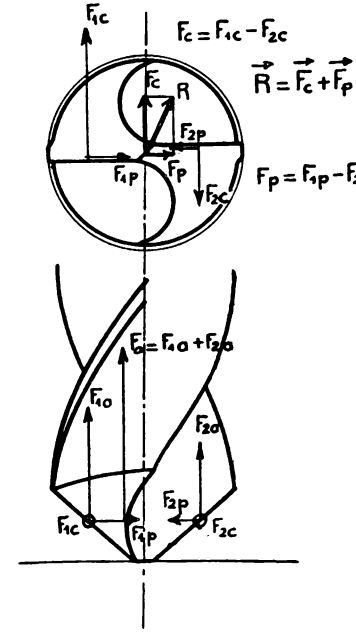


Fig. 9 *B.* — Efforts de la pièce sur un foret dont les lèvres ne travaillent pas de la même façon.

chantes ont la même longueur et sont également inclinées sur l'axe (cas du foret bien affûté), et si le métal travaillé est homogène (même résistance à la coupe dans toutes les directions).

b) Les efforts sur les deux lèvres sont inégaux (*fig.* 9 B).

Supposons $F_{1a} > F_{2a}$, $F_{1p} > F_{2p}$, $F_{1c} > F_{2c}$.

La résultante $F = F_{1a} + F_{2a}$ n'est plus confondue avec l'axe ; l'effort F, ainsi décalé de l'axe, favorise le flambage du foret.

Si nous négligeons l'épaisseur de l'âme, nous pouvons considérer que F_{1p} et F_{2p} ont une même direction. Leur résultante a ainsi pour valeur :

$$F_p = F_{1p} - F_{2p}.$$

Transportons maintenant les forces F_{1c} et F_{2c} sur l'axe en appliquant les couples de transport : $F_{1c} \times \frac{d}{2}$ et $F_{2c} \times \frac{d}{2}$ dont la somme : $(F_{1c} + F_{2c}) \frac{d}{2}$ est le couple de torsion équilibré par le couple d'entraînement.

Mais la résultante des forces transportées sur l'axe est :

$$F_c = F_{1c} - F_{2c}.$$

Les forces F_p et F_c admettent ainsi une résultante R, normale à l'axe, qui provoque la flexion du foret.

En résumé: si les efforts sur les deux lèvres ne sont pas égaux, il y a :

Tendance au flambage par excentrement de l'effort axial.
Flexion du foret due à la résultante R appliquée sur l'axe.

CONSÉQUENCES : Le perçage sera incorrect dans les deux cas suivants :

1° *Les efforts appliqués sur une lèvre restent, pendant la rotation du foret, toujours inférieurs à ceux qui s'exercent sur l'autre :* la réaction qui fait fléchir l'outil tourne avec lui et la pointe théorique du foret décrit, sur le plan de travail, un cercle ayant pour centre le point d'intersection de ce plan avec l'axe de de rotation et, pour rayon, la flèche prise par le foret. Le trou percé engendré par la pointe A′ la plus éloignée de l'axe de rotation, aura un diamètre *d′* plus grand que celui du foret *d* (*fig.* 10).

2° *Les efforts appliqués sur les deux lèvres sont inégaux pendant une partie de la rotation seulement :*

La pointe théorique du foret décrit une circonférence excentrée par rapport à l'axe de rotation. Le trou percé est plus grand et son axe n'est plus confondu avec l'axe de rotation : on dit que le trou a « coulé ».

Applications pratiques.

Les réactions du métal sur les lèvres du foret sont inégales dans les cas suivants :

Le foret est mal affûté.

Les copeaux taillés par les arêtes tranchantes n'ont pas la même section.

a) Le milieu de la pointe du foret est sur l'axe de rotation mais les deux lèvres ne sont pas également inclinées. Seule l'arête 1 taille un copeau, l'arête 2 ne travaille que sur le coin A (*fig.* 11). Le trou percé a un diamètre supérieur au diamètre du foret mais l'axe du trou coïncide avec l'axe de rotation. L'essai pratique, exécuté avec un foret volontairement mal affûté, met en évidence les résultats annoncés ci-dessus.

b) Les deux arêtes ont des longueurs inégales. L'essai pratique montre, qu'au départ, la pointe du foret, tournant autour de l'axe de rotation *xx′*, a tendance

à créer un cône de matière (*fig.* 12 A) ; ensuite le foret pénètre dans le métal en tournant, en raison de sa flexibilité, autour de son axe de pointe (*fig.* 10).

Le trou percé est plus grand, et son axe ne coïncide pas nécessairement avec l'axe de rotation : pratiquement, l'axe du trou percé est toujours dévié.

En fin de perçage, lorsque la pointe a débouché, l'inégalité des efforts sur les deux

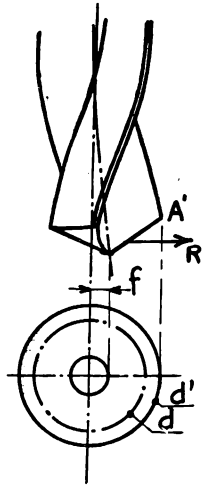


Fig. 10. — Travail d'un foret dont les efforts sur les lèvres ne sont pas égaux.

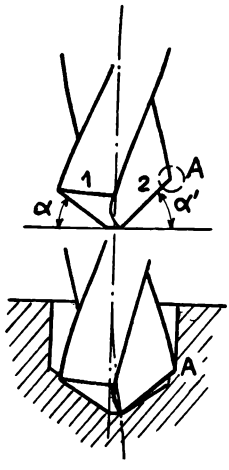


Fig. 11. — Mode d'action d'un foret mal affûté.

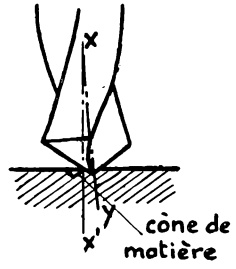


Fig. 12 *A.* — Mode d'action au départ d'un foret dont les lèvres sont inégales.

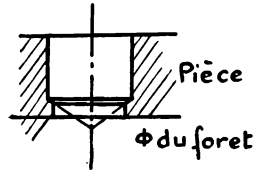


Fig. 12 *B.* — Sortie d'un foret à lèvres inégales.

lèvres est moins importante, la flexion du foret diminue, le diamètre du trou diminue également (*fig.* 12 B).

Le foret est bien affûté.

● **Le métal travaillé n'offre pas partout la même résistance à la coupe** (manque d'homogénéité) (*fig.* 13).

EXEMPLES. — Perçage entre « cuir et chair », dans une soufflure ou une goutte froide, dans une pièce moulée, dans une pièce en acier traité présentant une inégale répartition des constituants.

L'effort R incomplètement équilibré fait fléchir le foret dans le sens où la résistance à la coupe est plus faible. L'axe du trou percé n'est plus confondu avec l'axe de rotation ; il s'incurve : on dit que le trou « coule ».

On comprend aisément, et l'expérience le prouve, que la déviation sera plus importante pour un foret de petit diamètre, très flexible, que pour un foret de gros diamètre, plus rigide. Elle ne peut se poursuivre longtemps et le foret se brise.

● **A l'engagement du foret, ou à son débouchage, les efforts sur les arêtes tranchantes ne sont pas égaux** (*fig.* 13).

EXEMPLES.

— Perçage sur une surface oblique par rapport à l'axe de rotation. Une seule arête, celle qui est en contact avec le métal, est soumise aux efforts de coupe : le foret fléchit dès l'engagement et le trou percé est dévié.

— Coup de pointeau déporté par rapport à l'axe de rotation. Le foret fléchit dès l'engagement : le trou percé est dévié.

— Débouchage sur une surface oblique. Le foret est dévié en fin de travail car les efforts ne sont plus égaux sur chaque lèvre. Cette déviation a peu d'importance si la portion du trou déjà percé est assez longue pour assurer un bon guidage du foret.

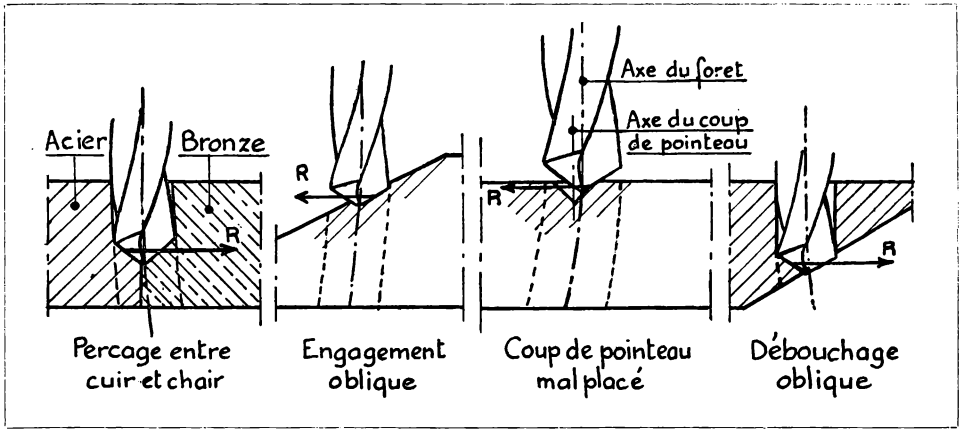


Fig. 13. — Exemple de mauvais travail du foret.

Usure des forets

Au cours des travaux de perçage on remarque facilement que l'usure se manifeste d'abord aux points *a*. La ligne de raccordement du listel avec la face en dépouille s'émousse, s'arrondit, et l'usure gagne l'arête tranchante sans toutefois atteindre la pointe (*fig.* 14 A).

Le couple de forage et l'effort de pénétration augmentent rapidement, la coupe devient impossible ; la température du foret s'accroît et peut atteindre celle du revenu.

Interprétation du phénomène.

Des essais ont été entrepris aux Ateliers G.S.P. ; ils ont permis de mesurer la composante tangentielle Fî de l'effort de coupe le long de l'arête tranchante millimètres par millimètres.

Le graphique (*fig.* 14 B) montre les variations de l'effort F_c de la pointe jusqu'en A ; l'effort est stabilisé pour une valeur voisine de $\frac{R}{2}$ de l'abscisse. Sa mesure est alors d'environ 1 600 N/mm² de section du copeau dans l'acier XC 60. Le frottement du foret sur la partie externe cylindrique fait croître l'effort dans la région A.

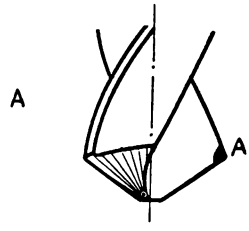


Fig. 14 *A.* — Usure d'un foret.

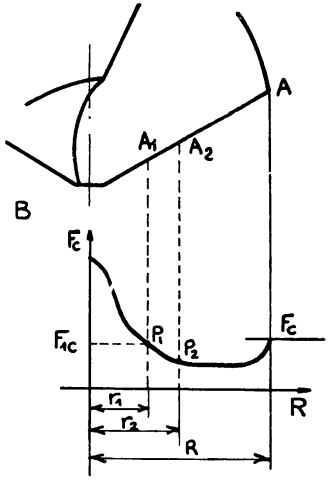


Fig. 14 *B.* — Répartition des efforts de coupe le long de l'arête de coupe d'un foret.

Au point P_1, à distance r_1 de l'axe, la puissance de coupe a pour expression

$$P = F_{1c}.V_1 = F_{1c}.\omega.r_1$$

(ω étant la vitesse angulaire du foret et F_{1c} l'effort de coupe correspondant à 1 mm d'arête).

En étudiant la variation du produit $F_{1c}.\omega.r_1$, le long de l'arête, on montre que P est maximum au point A : c'est là que le maximum de chaleur est libéré ; la lèvre est mince dans cette région et sa température s'élève facilement : l'usure (et même l'érosion) apparaît. Fc croît encore (arrachement) et le phénomène s'accélère.

Remède.

Il faut éviter l'élévation de température, donc arroser copieusement l'outil.

Pour obtenir de bons résultats, il faut un courant de liquide qui « emporte » les calories produites ; l'idéal serait d'avoir un courant descendant froid (vers la pointe) et un courant ascendant chaud entraînant les copeaux.

Avec les forets ordinaires et le perçage de haut en bas, le dégagement des copeaux est difficile ; on le favorise en perçant une faible longueur de trou puis en dégageant l'outil qui, ainsi, entraîne les copeaux hors de la pièce. On renouvelle l'opération autant de fois qu'il est nécessaire (ceci est indispensable pour les petits forets). Pendant que l'outil est hors du trou il est bien arrosé et, par conséquent, refroidi. Il existe d'ailleurs des petites perçeuses et des unités de perçage, qui donnent automatiquement les mouvements d'avance et de recul du foret pour assurer cette opération dite de « débourrage ».

Perçage des trous longs

Le débourrage, dans ce cas, serait long, fastidieux. On emploie donc des forets spéciaux avec lesquels on peut créer un double courant de liquide.

Ces outils sont :

— *des forets hélicoïdaux à tubes d'huile* (*fig.* 29) qui peuvent, dans les gros diamètres, porter des arêtes coupantes en carbure métallique : plaquettes rapportées.

— *des forets à une seule lèvre et à tube axial :* mèche demi-ronde, foret Pratt et Whitney (*fig.* 15).

La flexibilité du tube, servant d'entraîneur, contraint à limiter le couple de perçage ; on taille alors un copeau voisin du copeau taillé minimum en choisissant une avance de l'ordre de 0,1 à 0,05 mm et par conséquent, il faut augmenter la vitesse de coupe.

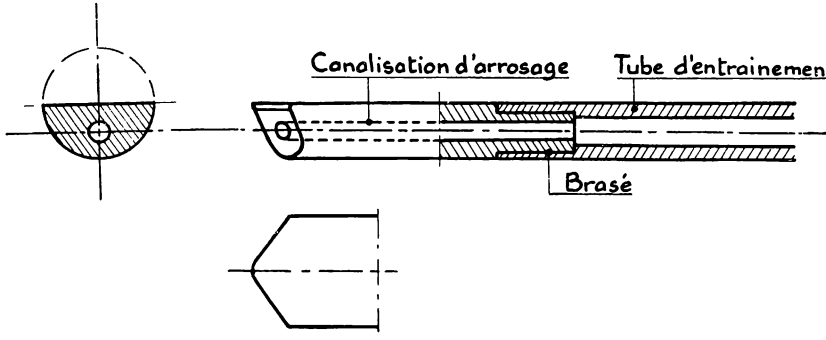


Fig. 15. — Foret demi-rond avec arrosage axial.

Le liquide d'arrosage doit être très fluide, afin de pouvoir passer facilement par les trous de faible diamètre prévus dans le foret. Il doit donc aussi circuler à grande vitesse afin que le débit soit suffisant : on l'injecte sous pression (pompe). Le pouvoir mouillant du liquide doit être élevé.

Rupture des forets en cours de travail

Le foret travaille à la *compression* et au flambage dès que le rapport de sa longueur à son diamètre est importante, sous l'action de l'effort d'avance. Le foret travaille en même temps à la *torsion* sous l'action du couple de forage dû à la réaction du métal usiné et équilibré par le couple moteur.

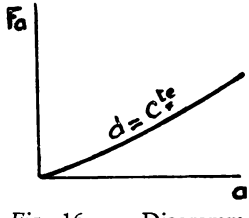


Fig. 16. — Diagramme de variation de l'effort d'avance F*a* en fonction de l'avance.

M. RENARD, directeur des Établissements G.S.P., a effectué de nombreux essais dans le domaine de la coupe des forets ; il conclut :

a) l'effort d'avance F_a est sensiblement *proportionnel* aux avances par tour pour un diamètre donné (*fig.* 16).

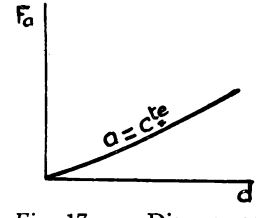


Fig. 17. — Diagramme de variation de l'effort d'avance F*a* en fonction du diamètre du foret.

b) pour une avance donnée, l'effort F_a est sensiblement proportionnel au diamètre du foret (*fig.* 17).

• *Compression.*

La contrainte de compression est $Rc = \frac{F_a}{S}$.

s : section du foret (goujures déduites) ; cette section, pratiquement, varie proportionnellement au carré du diamètre : $s = kd^2$.

Mais on a $F_a = k_1 d$ pour une avance donnée d'où :

$$R_c = \frac{k_1 d}{kd^2} = \frac{k_1}{k} \cdot \frac{1}{d} = \frac{Cte}{d}$$

La contrainte de compression augmente quand d *diminue.*

Pour un foret donné de diamètre d et une avance variable a :

$$R_c = \frac{F_a}{S} = \frac{k_2 a}{kd^2} = \frac{k_2}{k} \times \frac{a}{d^2} = a\,Cte$$

La contrainte de compression augmente avec l'avance par tour a :

La contrainte la plus faible correspond à l'avance a donnant le copeau taillé minimum.

• *Torsion.*

Pour un métal donné, les conclusions sont les suivantes :

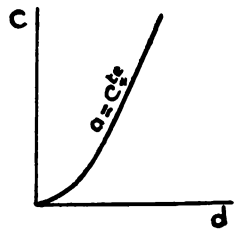


Fig. 18. — Diagramme de variation du couple en fonction du diamètre.

a) Le couple moteur croît proportionnellement au carré du diamètre d quand l'avance a reste constante.

$$C = k_1 d^2 \text{ (\textit{fig.} 18),}$$

b) Le couple moteur croît proportionnellement au carré de l'avance quand le diamètre d reste constant.

$$C = k_2 a^2.$$

La contrainte de torsion est donnée par la relation :

$$R_g = \frac{C}{\frac{I_0}{v}}$$

Pour un cercle $\frac{I_0}{v} = 0{,}2\,d^3$ ce que nous pouvons écrire : $\frac{I_0}{v} = k^3 d^3$

d'où $R_g = \frac{k_1 d^2}{k_3 d^3} = K_1 \frac{1}{d}$ pour $a =$ constante

ou $R_g = \frac{k_2 a^2}{k_3 d^3} = K_2 a^2$ pour $d =$ constante

donc :

La contrainte de torsion augmente quand le diamètre diminue ; elle augmente proportionnellement au carré de l'avance pour un diamètre constant.

Conclusions pratiques.

1° *L'augmentation des contraintes* de compression et de torsion du métal de l'outil quand le *diamètre diminue* explique le peu de résistance des petits forets. Cette augmentation est aussi fonction de l'avance qui doit être réduite très sensiblement pour les petits forets ; on se rapproche souvent du copeau minimum dont on s'efforce de réduire l'épaisseur par un affûtage très soigné.

Quand le foret s'émousse, le copeau taillé minimum croît ; les efforts de coupe augmentent exagérément et il faut redouter la rupture du foret ; il faut donc réaffûter fréquemment les petits forets. Il existe d'ailleurs d'excellentes machines d'affûtage pour forets de 1 à 5 mm ; il faut les employer et proscrire absolument l'affûtage manuel.

On emploie les petites perceuses sensitives pour le perçage des petits trous car l'ouvrier peut ainsi contrôler facilement l'augmentation de résistance à la coupe et procéder au remplacement du foret en temps utile.

2° L'augmentation de la contrainte de torsion proportionnellement au carré de l'avance pour un même diamètre de foret explique que les avances conseillées augmentent moins rapidement que les diamètres.

Tableau des avances pour forets en acier rapide supérieur.

Diamètres des forets mm	Avance par révolution pour			Diamètres des forets mm	Avance par révolution pour		
	Fonte	Acier doux	Acier 1/2 dur		Fonte	Acier doux	Acier 1/2 dur
1 à 5	0,20	0,15	0,10	25 à 40	0,60	0,45	0,30
5 à 10	0,30	0,20	0,15	40 à 60	0,70	0,50	0,35
10 à 15	0,40	0,30	0,20	60 à 100	0,80	0,60	0,40
15 à 25	0,50	0,40	0,25				

Valeur du rapport $\frac{a}{d}$ pour le travail de l'acier doux :

$d = 16 \quad a = 0{,}4 \quad \frac{a}{d} = \frac{0{,}4}{16} = \frac{1}{40}$

$d = 32 \quad a = 0{,}45 \quad \frac{a}{d} = \frac{0{,}45}{32} = \frac{1}{70}$

$d = 60 \quad a = 0{,}5 \quad \frac{a}{d} = \frac{0{,}6}{60} = \frac{1}{100}$

L'examen du tableau montre, par exemple, que l'avance varie de 1/40 à 1/100 du diamètre quand d passe de 16 à 60 mm pour le travail de l'acier doux.

D'autre part, l'étude de la variation du volume de copeaux produits et de la possibilité d'évacuation, montre qu'il faut limiter la progression de l'avance en fonction des diamètres des forets.

Ainsi : tandis que le volume des copeaux produit par tour de foret $\left(V = \frac{\pi d^2}{4} \times a\right)$ croît avec le produit du carré du diamètre par l'avance, la section des goujures d'évacuation ne croît qu'avec le carré du diamètre. Une augmentation trop importante de l'avance entraînerait un dangereux bourrage de copeaux.

PRINCIPES DE TRAVAIL

But à atteindre.

Le perçage a pour objet l'exécution en pleine matière d'un trou cylindrique :

— de diamètre précis,

— ayant pour axe une droite dont la position est bien définie.

La coïncidence de l'axe de rotation et de l'axe du foret suppose une machine entretenue en bon état mécanique, sans jeu entre broche et fourreau et entre fourreau et bâti. Une machine à percer exige un entretien aussi soigné que celui d'une machine à fraiser. Les surfaces de contact du foret et de la machine seront nettoyées et exemptes de marques dues à des chocs. Pour les petits forets à queue cylindrique, il faut toujours choisir des mandrins de bonne qualité et vérifier à la réception la coïn-

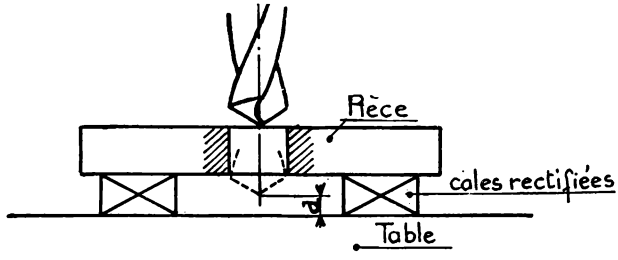


Fig. 19. — Débouchage d'un trou.

cidence des deux axes de rotation et du foret en utilisant une tige calibrée et un comparateur.

La mise en place de la pièce nécessite un contrôle de position par rapport à trois plans de référence. L'un de ces plans de référence est presque toujours constitué par la table de la machine qui doit être conservée en parfait état. On évitera de la détériorer en prévoyant toujours le débouchage des forets à une distance convenable d'elle (*fig.* 19). A cet effet on n'oubliera pas de placer les pièces sur cales métalliques de même épaisseur (cales appariées).

On doit être bien persuadé que pour obtenir un perçage précis, l'étau utilisé doit être d'une qualité analogue à celle de l'étau de fraisage. Le montage des pièces sur étau doit toujours être soigné.

Si l'on veut réaliser un perçage de précision, servant d'opération de demi finition avant alésage, le réglage en position de la pièce par rapport à l'axe du foret doit être fait à l'aide du comparateur : l'axe du foret sera matérialisé par une tige cylindrique

rectifiée spécialement à cet effet ; une équerre placée sur la table permettra le contrôle de la position de la pièce (*Cours de technologie de spécialité*).

Cette opération est généralement longue ; on la facilite en se servant d'une *table de semi-pointage* (*fig.* 20) pour les travaux d'outillage et en employant des guides de perçage pour les travaux réalisés en série (*fig.* 21).

Lorsque le perçage prépare l'alésage ou le taraudage, on pourra se contenter de tracer les axes du trou et le carré circonscrit pour assurer la mise en place du foret.

L'étude expérimentale du perçage nous a montré que la rectitude du trou et sa posi-

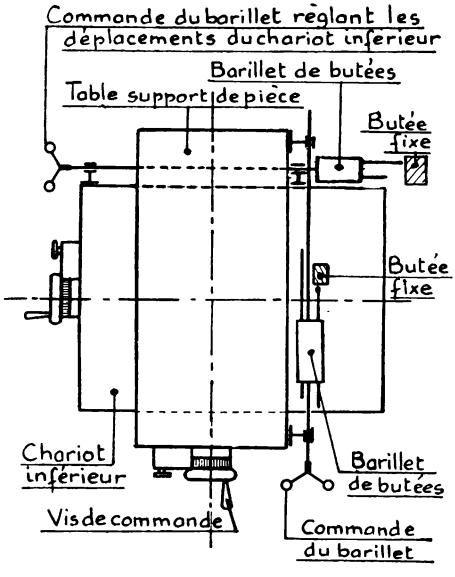


Fig. 20. — Table de semi-pointage.

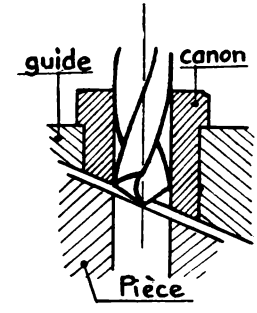


Fig. 21. — Guide de perçage.

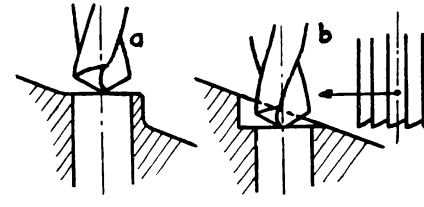


Fig. 22. — Formes à donner aux pièces pour obtenir un départ de perçage correct.

tion dépendent de l'engagement du foret, de son dégagement, de l'homogénéité du métal travaillé, de la flexibilité du foret et de son affûtage.

L'engagement du foret doit se faire sur une surface dressée perpendiculaire à l'axe du foret. Il appartient au dessinateur de penser à cette règle lorsqu'il décide de la forme des pièces ; prévoir des bossages, lamages ou fraisages (*fig.* 22).

Le perçage, en principe, ne doit pas être la première opération dans une gamme d'opérations. La face d'attaque doit être tournée, rabotée, fraisée ou tout au moins meulée.

C'est pendant la pénétration de l'âme du foret que le foret risque le plus de dévier car vers la pointe le métal n'est pas coupé.

Pour assurer un bon départ du trou, différentes solutions peuvent être envisagées :

Trous de petits diamètres : ⌀ < 5 mm.

a) Sans précision particulière de diamètre et de position : coups de pointeau bien situés à l'intersection des axes tracés ; le pointeau doit être tenu bien normalement à la surface d'attaque sur la pièce.

b) Avec précision :

on amorce le trou avec un petit foret plat (*fig.* 23) ou, mieux, avec un foret à centrer qui ne fléchit pas en raison de sa petite longueur.

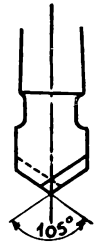


Fig. 23. — Foret plat pour amorçage d'un trou.

Trous de diamètres moyens : 5 < ⌀ < 25 mm.

a) Sans précision spéciale :

attaque directe sur surface usinée, avec diminution de moitié de l'avance pendant la pénétration de la pointe du foret ; coup de pointeau.

b) avec précision imposée par les tolérances :

— amorçage du trou avec un foret court ou un foret à centrer,

— perçage d'un avant-trou de diamètre au moins égal au tiers ou au quart du diamètre du trou à percer

$$d > \frac{D}{3} \text{ à } \frac{D}{4}$$

Trous de grands diamètres : ⌀ > 25 mm.

a) Sans précision :

amorçage du trou avec un foret court ou perçage d'un avant-trou.

b) Avec précision imposée par des tolérances :

Le perçage d'un avant-trou est indispensable.

Le foret de gros diamètre pourra corriger les erreurs de direction de l'avant-trou car il est plus rigide que le foret utilisé en première opération. La précision du travail sera d'autant plus grande que la différence des diamètres du trou à percer et de l'avant-trou sera plus faible ; les efforts sur chaque lèvre seront ainsi peu importants et leur résultante R, appliquée sur l'axe, sera réduite.

On pourra prendre un diamètre d'avant-trou de 0,4 d dans ce cas, c'est celui qui réduit le plus le travail mécanique nécessaire à la réalisation du trou final cherché.

Quand le métal n'est pas homogène le foret a tendance à dévier ; plus le foret est flexible (donc de petit diamètre) plus la déviation est importante. Donc lorsqu'on perce des trous coaxiaux de diamètres différents, il faut le faire dans l'ordre décroissant des diamètres : d_1, d_2, d_3. Cette façon de procéder réduit d'ailleurs le temps total d'exécution (*fig.* 24).

Quand l'attaque ou la sortie du foret doit s'effectuer sur une surface oblique par rapport à son axe, il faut absolument guider le foret (cheminée de perçage ou canon)

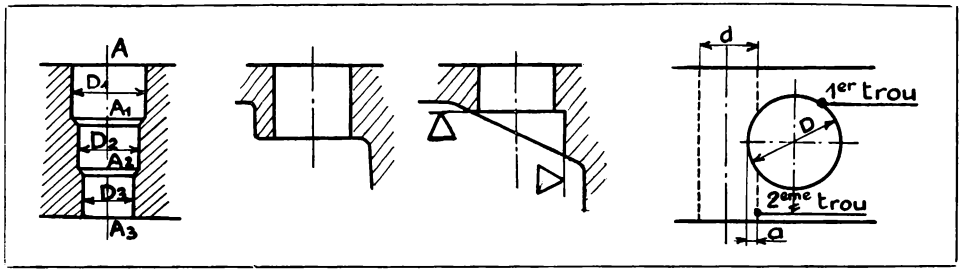


Fig. 24. — Exécution de trous de différents diamètres coaxiaux.

Fig. 25. — Formes à donner aux pièces pour obtenir une sortie de foret correcte.

Fig. 26. — Réalisation de trous sécants.

(*fig.* 21 et 27). Quand on veut percer des trous sécants on est conduit à utiliser un guide-foret en acier trempé (voir *fig.* 26 et 27).

On peut se passer de guide pour percer un trou sécant avec un autre, sans nuire à la précision, si l, étant la distance des axes, on a :

$$\frac{D - d}{2} - l' < \frac{D}{10}$$

On a évidemment intérêt à percer d'abord le petit trou en pleine matière (*fig.* 26).

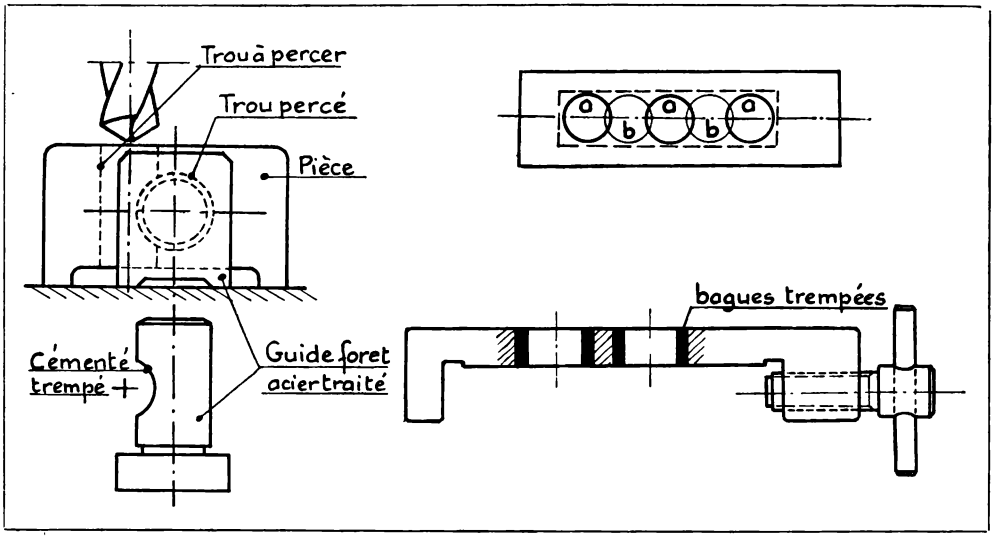


Fig. 27. — Guide pour perçage de trous sécants à axes perpendiculaires.

Fig. 28. — Guide pour perçage de trous sécants à axes parallèles.

Découpage d'une mortaise par trous sécants.

Il faut prévoir un nombre impair de trous : on perce d'abord (*fig.* 27) la série *a* puis la série *b* ; ainsi les efforts de coupe sur chacune des arêtes tranchantes du foret sont toujours égales. Le tracé des centres doit être soigné et, au besoin, on perce des avant-trous. Si la série de pièces est importante on a intérêt à construire deux gabarits de perçage (*fig.* 28).

Perçage des trous profonds.

Quand le trou a une profondeur de plus de vingt diamètres le perçage présente toujours des difficultés surtout en ce qui concerne la conservation de l'outil (cas du perçage d'une broche de machine-outil). Chaque fois qu'on le pourra on procédera en retournant la pièce bout pour bout ce qui réduit de moitié la profondeur ; le retournement doit être précis.

On rencontre les difficultés suivantes :

a) ***grande tendance au flambement de l'outil au début de l'opération;*** on emploie un guide pour commencer, guide que l'on effacera dès qu'il

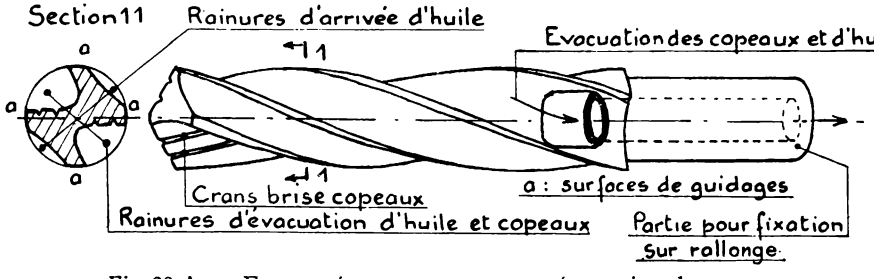


Fig. 29 A. — Forets prévus pour arrosage et évacuation des copeaux.

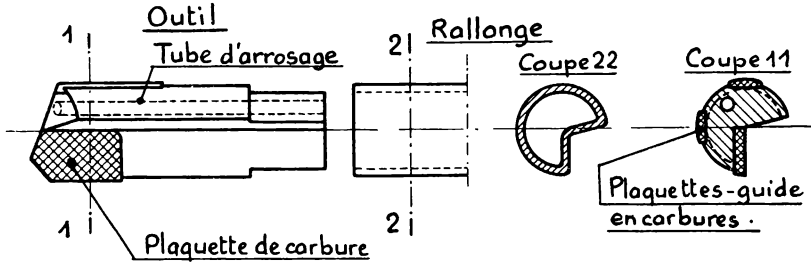


Fig. 29 B. — Foret prévu pour usinage profond avec plaquette de carbure.

deviendra gênant pour poursuivre le travail, on peut aussi commencer le trou avec un foret de la série normale ;

b) ***déformation par torsion de l'outil et de sa « rallonge » :*** l'angle de torsion α proportionnel à la longueur de la pièce sollicitée à la torsion.

Les formules de mécanique relatives à la torsion donnent

$$G\theta I_0 = C \quad \text{avec} \quad \theta = \frac{\alpha}{l} \quad \text{d'où} \quad G\frac{\alpha}{l} I_0 = C \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{Cl}{GI_0}$$

C : couple de torsion ; l : longueur de l'outil ; G : module d'élasticité transversale ; I_0 : moment d'inertie polaire soit 0,05 d^4 pour une section circulaire ; Ainsi $\alpha = K/C$;

comme l est grand, α l'est aussi. D'autre part le couple C dû aux efforts de coupe sur chaque lèvre du foret est constamment variable ; les déformations élastiques de l'outil sont donc variables : il y a risque de broutage (vibrations) ;

c) ***évacuation des copeaux difficile.***

d) ***amenée du liquide de coupe compliquée.***

Pratiquement on emploie des forets spéciaux montés sur rallonge tubulaire ; les copeaux circulent dans les goujures dans le même sens que le liquide d'arrosage amené sous pression (jusqu'à 50 kg/mm²) (*fig.* 29).

Si les copeaux sont fragmentés leur évacuation est plus facile. On obtient cette fragmentation en faisant varier l'effort d'avancement du foret ou en pratiquant des petites entailles sur les lèvres du foret : brise-copeaux. On peut aussi procéder par perçage intermittent en retirant le foret plusieurs fois pendant le travail dont la durée se trouve alors sensiblement allongée ; quand on dégage le foret les copeaux sont entraînés et en outre les tranchants sont présentés sous un jet de liquide qui les refroidit et les lubrifie. On recommande également de refroidir la pièce en usinage en l'arrosant copieusement.

Conditions de coupe

Vitesses de coupe.

En première approximation, on peut adopter les valeurs suivantes, pour un foret de $d = 10$ mm :

Fonte douce	640 tr/mn
Acier doux	800 tr/mn
Laiton-métaux tendres	1 250 tr/mn.

Pour un foret de diamètre différent d, on multipliera ces valeurs par $\frac{10}{d}$.

Avance par tour.

On prend en première approximation le $\frac{1}{100}$ du diamètre du foret.

Exemple. — Pour un foret de 15 mm, prendre $a = \frac{15}{100} = 0{,}15$ mm.

Application.

Longueur de trou percé en une minute par un foret de $d = 10$, dans de l'acier doux :

$$l = \frac{10}{100} \times 800 = 80 \text{ mm}$$

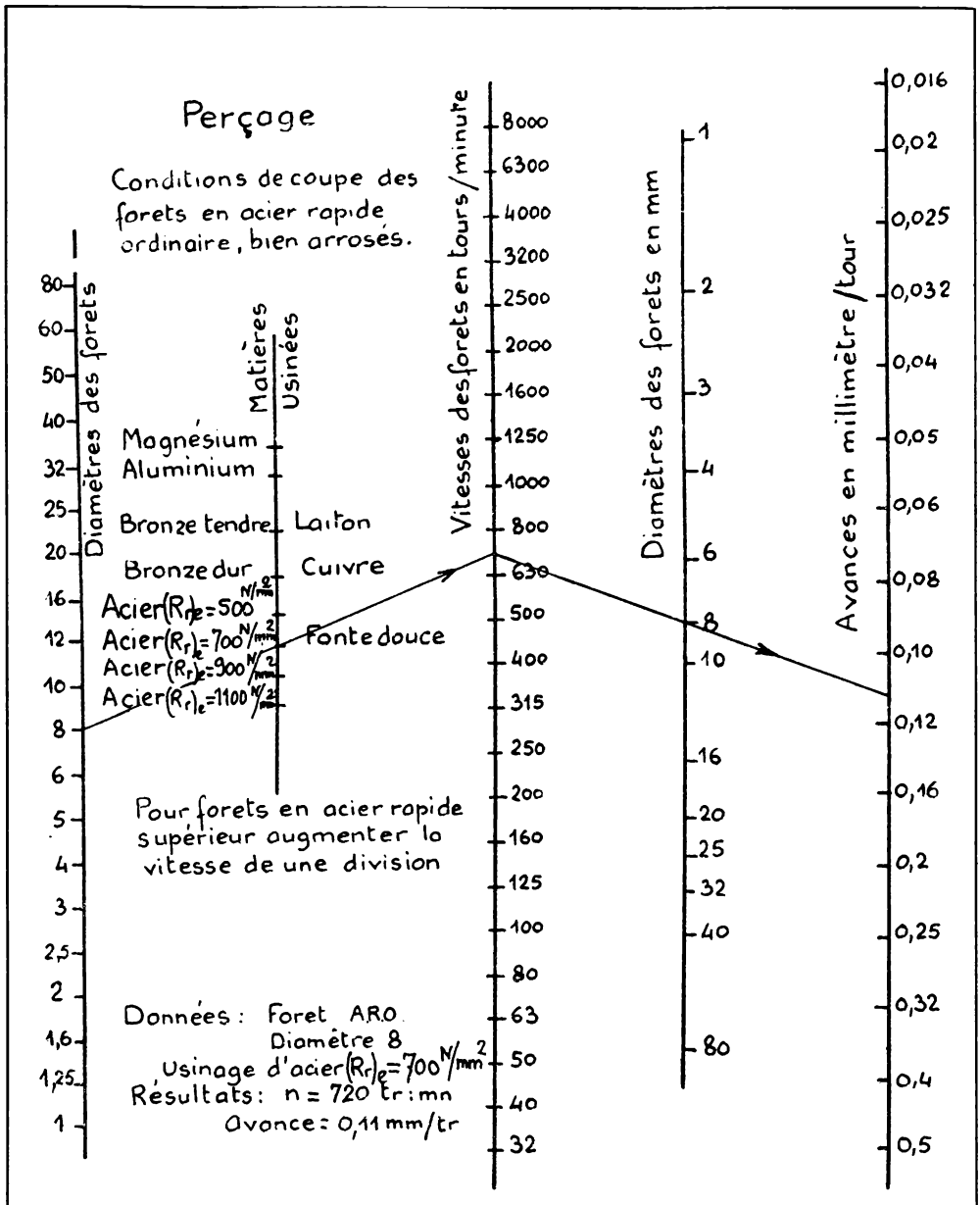


Fig. 32. — Diagramme donnant les conditions de coupe des forets.
Rappelons que 1 kgf/mm² ≈ 10 N/mm².

En général, la vitesse de coupe pour un foret de diamètre d est : $800 \times \frac{10}{d}$

et l'avance : $\frac{d}{100}$

par conséquent la longueur de trou percé en une minute s'exprime par :

$$L = 800 \times \frac{10}{d} \times \frac{d}{100} = 80 \text{ mm} = \text{constante}$$

Conclusion.

En *première approximation* on peut admettre que l'on perce par minute :

fonte : 64 mm acier doux : 80 mm métaux tendres : 125 mm,
quel que soit le diamètre du foret.

Remarque.

En réalité, la longueur de perçage doit être majorée de la hauteur h de la pointe du foret. Cette hauteur est égale à environ la moitié du rayon (*fig.* 31).

Exemple. — Temps pour percer à $d = 40$ mm une pièce dont l'épaisseur est de 100 mm ; pièce en fonte.

On a :

$$L' = L + 110 = 100 + 10 = \frac{40}{4} \text{ mm}$$

$$T = \frac{110}{64} = \frac{17}{10} \text{ mn}$$

Graphique :

Pour les travaux qui se répètent, il vaut mieux déterminer les conditions de coupe optimum à l'aide du graphique (*fig.* 32).

MACHINES UTILISÉES POUR LE PERÇAGE

Machines à percer.

En plus du matériel portatif (machines à commande manuelle, machines électriques ou pneumatiques) on distingue :

les *sensitives* (*fig.* 33),
les machines à percer à *colonne* (*fig.* 34),
les *radiales*.

Il faut y ajouter :

les *unités de perçage*,
les machines à pointer.

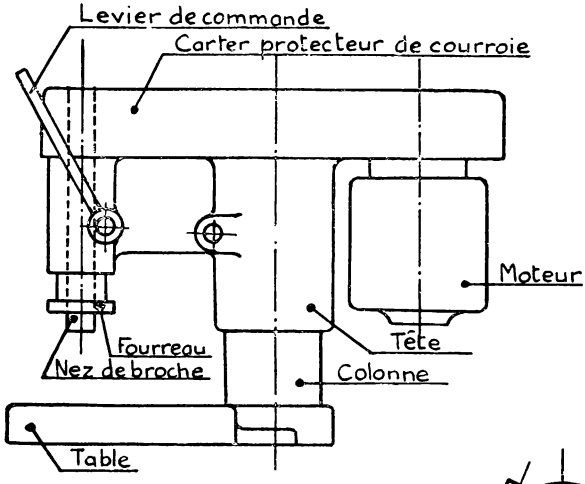


Fig. 33. — Perceuse sensitive.

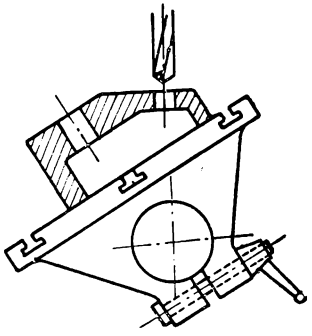


Fig. 35. — Emploi de la table inclinable.

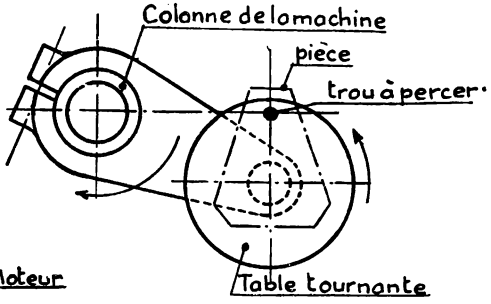


Fig. 36. — Emploi du support de pièce orientable.

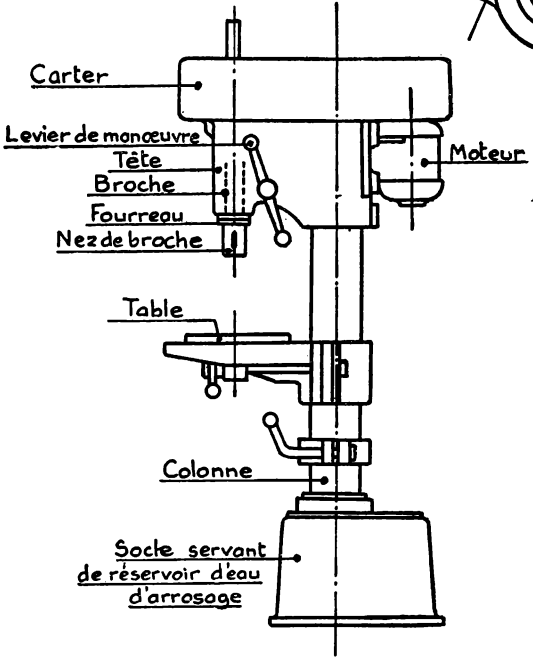


Fig. 34. — Perceuse à colonne.

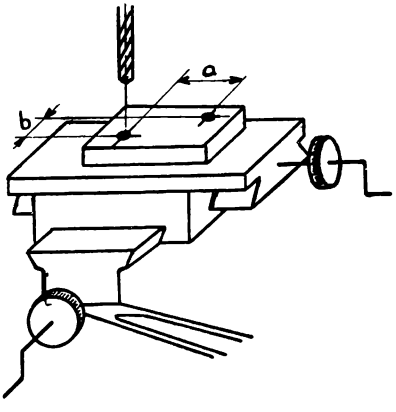


Fig. 37. — Chariots croisés à déplacement par vis contrôlé par tambours gradués.

Machine sensitive ou d'établi.

Elle est utilisée jusqu'à $\phi = 15$ mm et pour les travaux sur de petites pièces, faciles à tenir à la main ou serrées dans un petit étau posé simplement sur la table de la machine.

La sensitive peut être montée sur un socle.

Une courroie plate ou une série de courroies trapézoïdales lie le moteur à la broche.

Le porte-broche peut, parfois, tourner autour de la colonne.

La table est lisse ou comporte des rainures en T.

Il existe des perceuses sensitives dont la table est circulaire et animée d'un mouvement de rotation ; la table tourne en sens contraire du foret : on obtient de meilleurs résultats, ainsi, pour le perçage des petits trous de grande longueur.

Machine à colonne.

On l'utilise du ϕ 15 au ϕ 40 environ. La machine est plus robuste et reçoit des pièces qui peuvent peser plusieurs dizaines de kilogrammes. La pénétration du foret est mécanique car l'opérateur se fatiguerait vite s'il devait l'assurer manuellement.

Ces machines comportent une boîte de vitesses et une boîte d'avances, logées dans un même carter qui sert également de guide de broche et qui supporte, en outre, le moteur électrique (*fig.* 34). La machine a également une avance manuelle (grâce au débrayage de l'avance automatique) pour réaliser des petits perçages, l'approche rapide du foret et les opérations de taraudage pour lesquelles la machine possède d'ailleurs un renversement de marche.

Certaines machines comportent aussi un dispositif qui donne une avance mécanique discontinue à la broche : avance lente, retour rapide de faible amplitude alternés. Ce sont les machines dites à « foret sautillant » qui provoquent la fragmentation des copeaux et qui conviennent bien au perçage des petits trous. Quand le retour en arrière du foret a une valeur plus importante la machine assure le « débourrage » des copeaux.

L'emploi d'une table inclinable (*fig.* 35) permet de percer des trous à axes non parallèles.

Certaines perceuses à colonne (*fig.* 36) ont un support de table qui peut tourner autour de cette colonne ; la table tournant autour de son axe on peut donc amener un point déterminé de la pièce exactement dans l'axe de la broche sans débrider la pièce.

Il existe aussi des machines à percer munies de deux chariots croisés à commande par vis équipées de tambours gradués (*fig.* 37) : on déplace ainsi la pièce suivant deux coordonnées rectangulaires.

Les Établissements G.S.P. ont créé une perceuse à colonne à *chariots sensitifs* qui se déplacent sans effort sur des galets cylindriques servant de chemins de roulement. On peut donc passer sans difficulté d'un trou à un autre en suivant le tracé (coups de pointeau) ; deux leviers assurent l'immobilisation des chariots pendant le travail. Cette table (*fig.* 38) peut recevoir un porte-pièce pour les travaux sériels, les pièces y sont placées sans traçage préalable et le foret est engagé successivement dans les différentes cheminées du montage sans difficulté : on verrouille la table pendant le perçage. On obtient ainsi des pièces interchangeables.

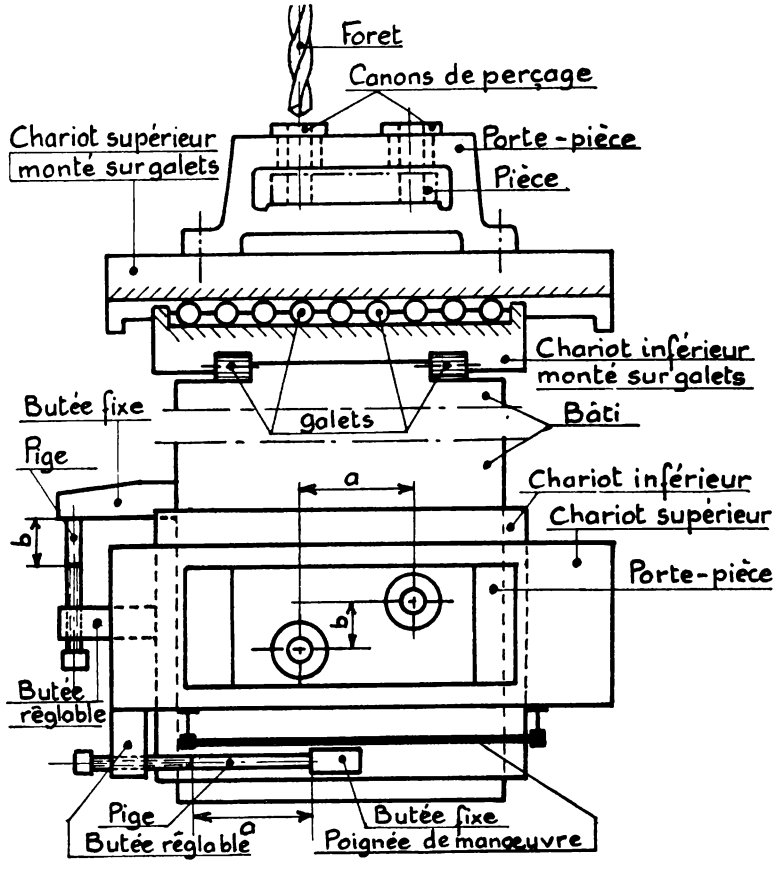


Fig. 38. — Chariots croisés sensitifs pour machine à percer.

Machines radiales.

Sur les machines étudiées jusqu'à présent, l'opérateur déplace la pièce par rapport à la broche pour percer successivement les trous d'une même pièce. Au contraire, sur les radiales, c'est la broche que l'on amène en position par rapport à la pièce qui demeure fixe. La pièce est placée directement sur le socle de la machine ou sur une table fixe (*fig.* 39) ou orientable (*fig.* 40). Le foret est amené en regard du coup de pointeau ou engagé dans les canons de perçage du porte-pièce. C'est la meilleure solution quand les pièces sont lourdes ; il est plus facile de déplacer le porte foret que de manutentionner la pièce : la solution est plus économique.

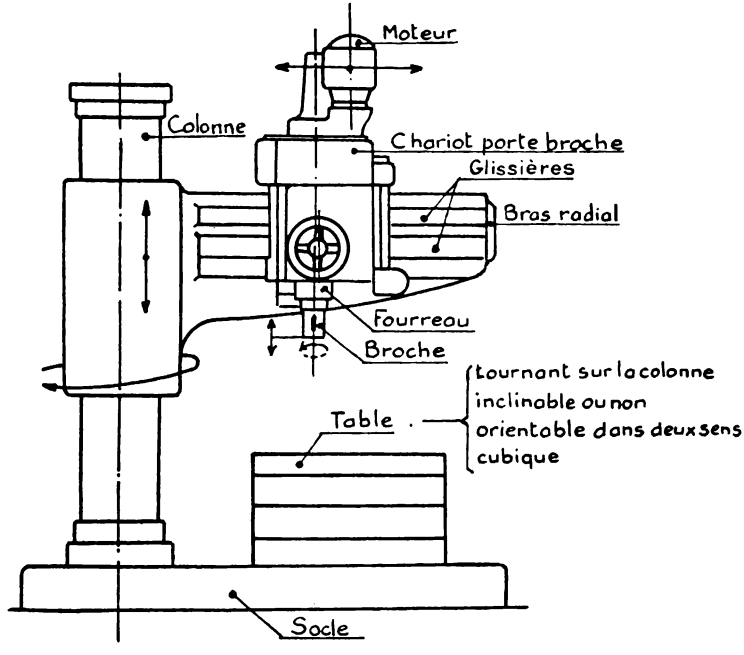


Fig. 39. — Machine à percer radiale à table fixe.

Sur les radiales on trouve une véritable machine à percer du type de celle des machines à colonne. C'est un ensemble logé en carter renfermant boîte des vitesses et boîtes des avances. Cet ensemble se déplace sur les glissières horizontales du bras radial. Ce bras tourne autour de la colonne et peut faire une révolution complète ; en outre il peut recevoir un mouvement dans le plan vertical (monte et baisse) pour que la machine puisse accepter des pièces de hauteur variable. Pendant le perçage le bras est immobilisé complètement au moyen de verrous manuels ou électro-magnétiques. Une rotation de 90° du bras permet de dégager complètement la table pour installer la pièce. On peut amener le bras face à une deuxième table par une rotation

de 180° il est alors possible d'installer une pièce sur l'une des tables pendant qu'un deuxième ouvrier travaille.

Si l'on utilise un porte-pièce tournant on peut percer tous les trous qui sont placés sur les faces latérales d'une pièce prismatique (*fig.* 40). On construit des radiales qui sont ainsi spécialement adaptées aux fabrications de série.

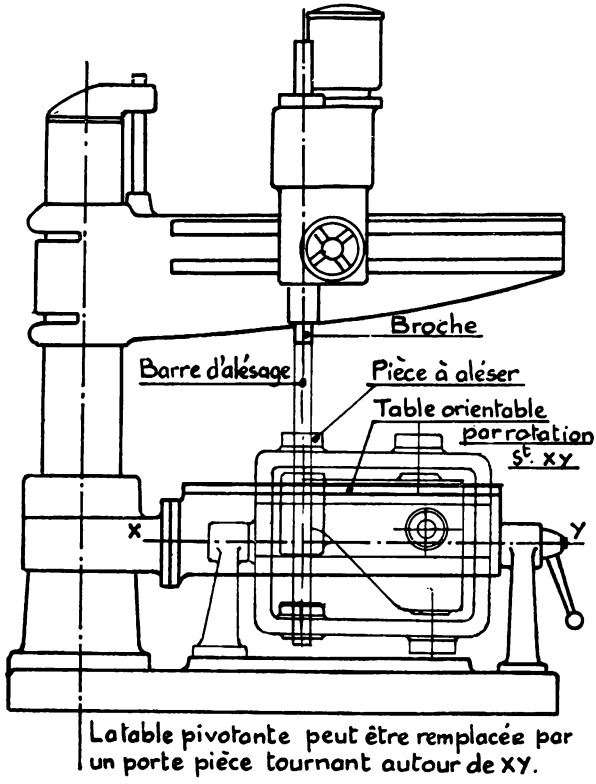


Fig. 40. — Machine à percer radiale à table orientable.

Ces machines sont maintenant très précises et très maniables et on les emploie fréquemment comme machines à aléser en particulier quand les alésages sont de longueur inférieure à la course maximum de leur broche. On substitue alors au foret une barre d'alésage à grains rapportés ; cette barre peut travailler en l'air ou être guidée par les portées du porte-pièce ; si le porte-pièce offre deux portées on lie alors la barre au nez de la broche par un joint articulé. On peut évidemment employer les alésoirs. Dans les travaux de série le changement des outils montés sur la broche s'effectue très rapidement grâce à l'emploi d'entraîneur à préhension accélérée type mandrin Presto à billes.

On peut aussi faire tous travaux de taraudage, de lamage et de chambrage. Dans certaines usines de construction automobile on trouve des batteries de radiales sur lesquelles les pièces passent successivement. Chaque machine est alors complétée par un panneau où les outils sont placés dans l'ordre de leur utilisation ; l'opérateur les replace toujours dans cet ordre et ainsi les temps de montage des outils sont extrêmement réduits.

Si l'on change de fabrication ces radiales sont faciles à rééquiper.

Machines à percer à broches multiples.

Dans le cas de pièces de petites dimensions au lieu d'employer successivement plusieurs machines alignées, on peut utiliser une machine à broches multiples (*fig.* 41).

Cette machine comporte un socle unique et, souvent, un seul moteur actionnant de 2 à 8 broches... disposées parallèlement. L'avance est souvent manuelle mais il existe des machines où elle est mécanique. Chaque broche porte un outil différent : forets de différentes longueurs ou de différents diamètres, tarauds, alésoirs... L'ouvrier présente successivement la pièce ou la boîte de perçage sous chaque broche. Dans les fabrications intensives une ouvrière est placée en face de chaque broche : les pièces (ou les boîtes) passent de main en main.

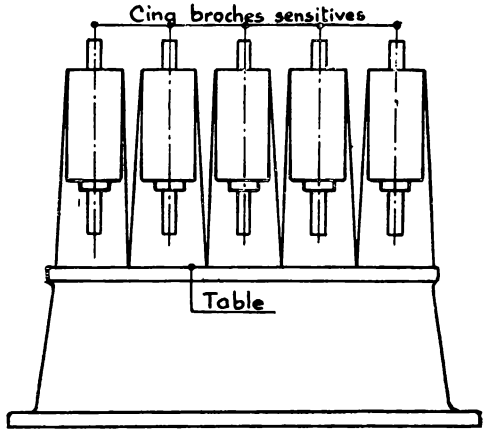


Fig. 41. — Machine à percer à broches multiples.

Si les fabrications doivent se poursuivre longtemps on équipe les perceuses à colonne à l'aide de têtes à broches multiples. Deux solutions sont possibles :

a) Boîtier à entraxes fixes (*fig.* 42)
Chaque broche peut avoir une vitesse différente.

b) Porte-broches à entraxes variables comme sur la machine à broches multiples (*fig.* 43). La broche de la machine attaque une roue dentée centrale qui commande les intermédiaires et les roues des broches auxiliaires. Les porte-forets sont réglables par rapport à l'axe de la broche d'entraînement ; ils reçoivent leur mouvement par un arbre télescopique articulé. On a réalisé des machines avec une cinquantaine de forets de diamètres différents ; on peut d'ailleurs placer des broches sur les roues intermédiaires de la boîte mais alors il faut les équiper avec des forets avec hélice à gauche. Pour obtenir différentes longueurs de trous on utilise des forets de longueurs variables.

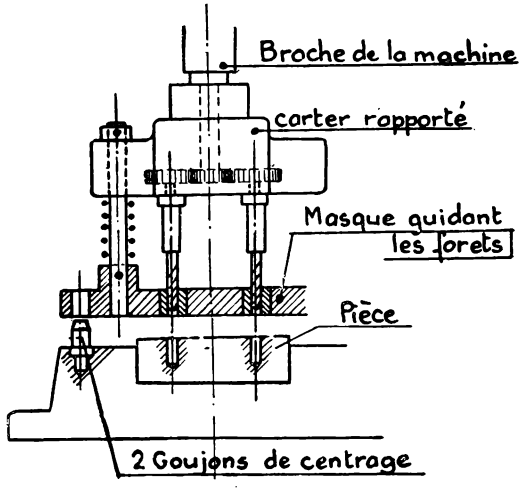


Fig. 42. — Boîtier pour broches multiples à entraxes fixes.

Pour utiliser les perceuses à broches multiples aussi près que possible de leur capacité maximum, on peut percer des trous sur plusieurs pièces différentes ou sur les différentes faces d'une même pièce présentée dans plusieurs positions (*fig.* 45).

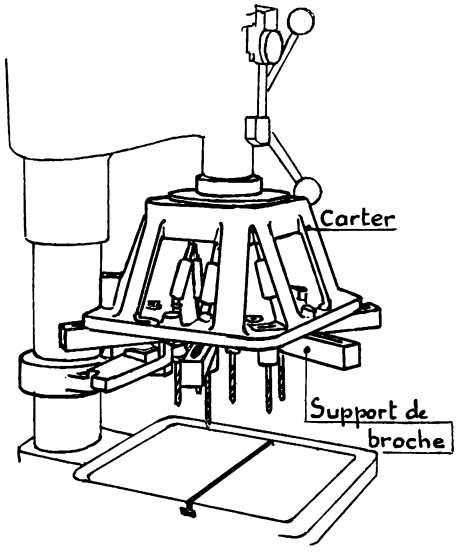


Fig. 43. — Porte-broches à entraxes variables montés sur perceuse à colonne.

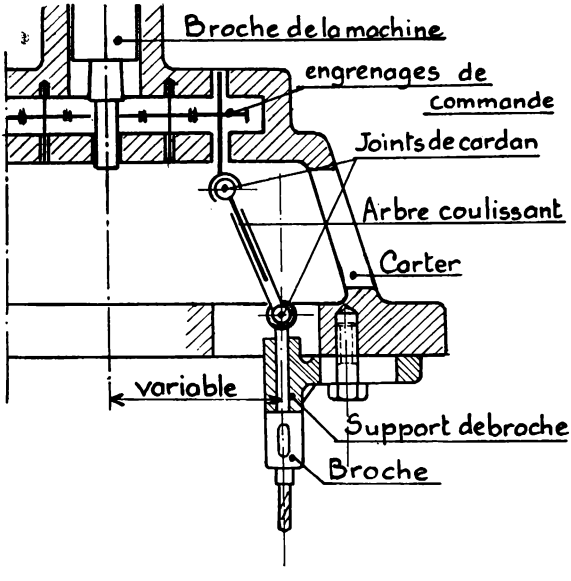


Fig. 44. — Détail de la commande des broches d'un porte-broches.

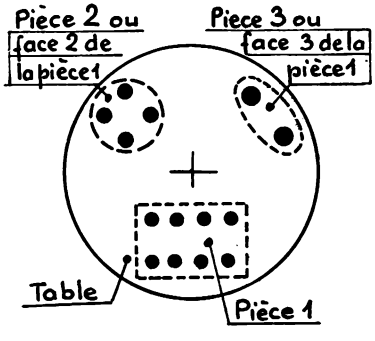


Fig. 45. — Perçage simultané de plusieurs pièces montées sur la même table.

Unités de perçage.

Depuis 1945 on a vu se développer l'emploi des unités de perçage. La *figure* 46 montre une unité RENAULT à commande électro-mécanique ; elle comporte deux moteurs l'un donnant la vitesse de coupe, l'autre l'avance de l'outil.

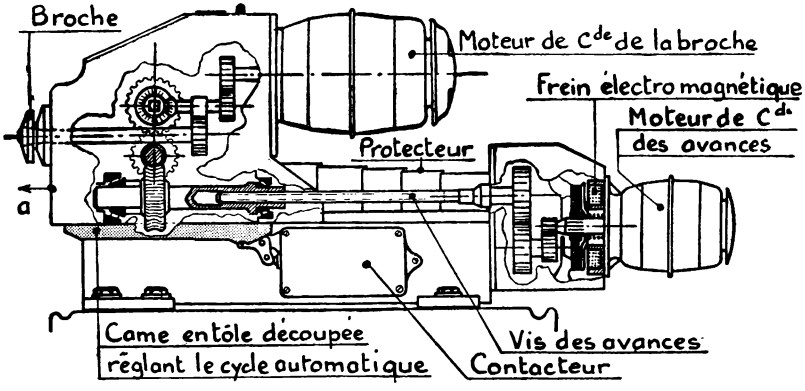


Fig. 46. — Unité de perçage à commande électro-mécanique.

L'avance peut être mécanique ou hydraulique, continue ou non ; dans le second cas (perçages de trous de grande longueur) le foret avance puis recule rapidement ; revient rapidement à la place qu'il avait quittée, fore lentement, recule à nouveau : c'est le perçage avec débourrage automatique. Le cycle des avances est déterminé

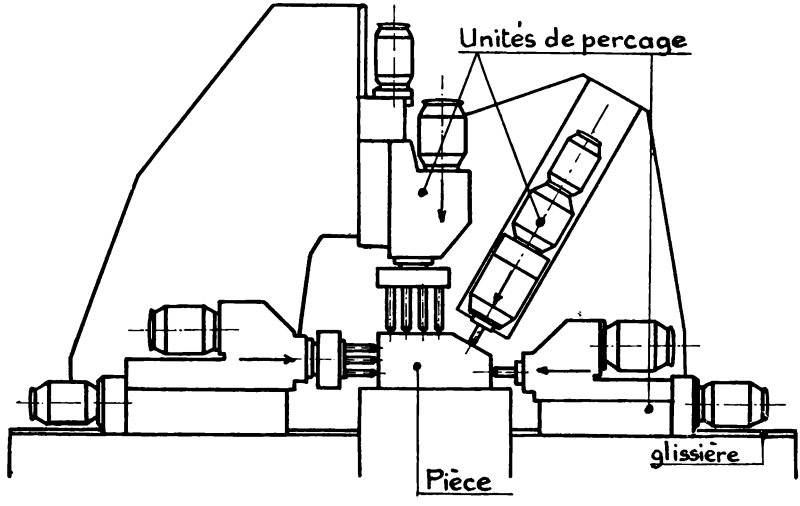


Fig. 47. — Groupement sur bâti en acier soudé de plusieurs unités.

par une came en tôle bleue qui agit sur un contacteur à combinaisons multiples. Pendant le recul rapide la broche s'arrête.

Ces machines (*fig.* 47) peuvent être groupées sur un bâti unique, généralement en tôle soudée : on leur donne ainsi différentes orientations de broche et l'on peut percer simultanément des trous sur plusieurs faces sauf sur celle qui lie la pièce à la table de la machine. Un distributeur électrique anime les unités en temps voulu, limite l'appel de courant total et évite que les bâtis ne se rencontrent.

En partant de ces idées on a réalisé de nombreuses machines spéciales. Parfois la pièce est montée sur un plateau tournant (*fig.* 48) : un même trou (ou plusieurs) peut être successivement présenté devant un foret, un alésoir d'ébauche puis l'alésoir finisseur, devant un taraud, une lame de chambrage. Sur la *figure* 48 on voit que les deux trous seront usinés après une révolution complète de la pièce.

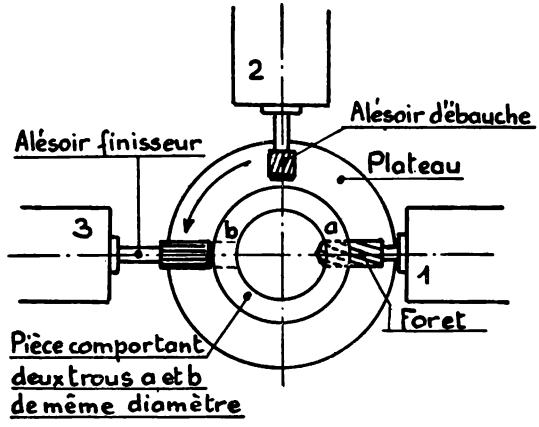


Fig. 48. — Machine à plateau tournant 3 unités, 3 outils, opération relativement longue.

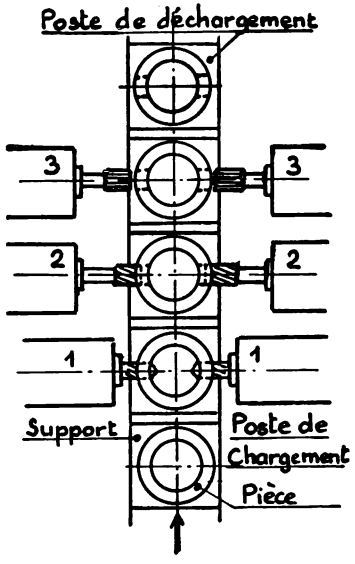


Fig. 49. — Machine transfert, 6 unités, 6 outils. Temps d'usinage très court.

Exemple d'un cycle de travail.

1er temps : 1 perce le premier trou.
2e temps : 2 alèse en ébauche le premier trou.
3e temps : 3 alèse en finition et 1 perce le 2e trou.
4e temps : 2 alèse en ébauche le 2e trou.
5e temps : 3 alèse en finition le 2e trou.

Au lieu de faire tourner la pièce, on peut la « transférer » suivant une trajectoire rectiligne dans un plan horizontal. La pièce est liée à un support qui l'oriente convenablement et qui la repère devant chaque unité d'usinage (*fig.* 49). C'est sur ce principe qu'ont été réalisées les machines transfert qui équipent les ateliers de la Régie Renault.

2. — L'ALÉSAGE

En construction mécanique, l'assemblage des pièces par ajustement cylindrique est fréquent, parce qu'on peut le réaliser avec précision et rapidité.

La partie contenue, l'arbre, est généralement usinée au tour ou à la machine à rectifier. Le contenant, l'alésage, s'obtient par une suite d'opérations qui font l'objet de cette étude.

Le mot d'alésage est également employé pour désigner ces opérations d'usinage, et par extension, tout usinage de surface intérieure : alésage conique, sphérique, travaux spéciaux (examinés en fin de chapitre).

Usinage des surfaces cylindriques intérieures.

Problème à résoudre.

a) La surface à produire est géométriquement définie par sa forme cylindrique : axe rectiligne, génératrices rectilignes, directrice circulaire.

La précision à tenir est, le plus souvent, celle des qualités 6, 7 et 8 (quelques centièmes de mm).

L'état de surface est représenté par ▽▽ ou ▽▽▽.

b) La situation sur la pièce de la surface à produire est définie par les cotes de position de son axe par rapport aux plans de référence.

L'alésage peut être réalisé en pleine matière ou en partant d'un trou venu de fonderie.

Nous étudierons successivement la réalisation géométrique de l'alésage, puis, sa mise en position.

Réalisation d'une surface cylindrique intérieure

ayant une forme géométriquement définie par des tolérances précises : 6-7-8.

Étude expérimentale.

Les constatations faites en atelier montrent que :

a) le foret ne permet pas, seul, de réaliser un trou avec précision, car c'est un outil flexible et son travail est imparfait :

— l'axe n'est pas rigoureusement rectiligne,

— le diamètre du trou percé est toujours supérieur au diamètre de l'outil et ne peut être obtenu avec précision, en raison des difficultés d'affûtage,

— l'état de surface est mauvais. La profondeur du sillon hélicoïdal laissé par le foret est de 50 à 100 microns.

Conclusions :

On ne peut obtenir, au foret, une surface assurant un assemblage cylindrique précis. Le perçage est le plus souvent une opération d'ébauche. Il faut recourir à des opérations complémentaires d'alésage.

b) sur le tour on peut, à l'outil tranchant unique, réaliser correctement l'usinage d'un trou cylindrique si son diamètre D est assez grand (D > 30 mm environ), et si la longueur de porte-à-faux imposée à l'outil est faible (L < 2,5 D environ) (*fig.* 1).

Les opérations d'usinage sont les suivantes :

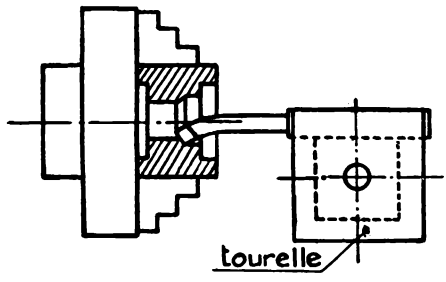


Fig. 1. — Alésage sur le tour.

- une ébauche réalisée avec un outil dont l'angle de direction est d'environ 45°, en adoptant une avance et une profondeur de passe importantes :

  diamètre obtenu $D_2 = D - 2$

- une passe de demi-finition avec avance réduite :

  diamètre obtenu :

  $D_1 = D - 0{,}2$ à $0{,}4$.

- une passe de finition avec avance réduite.

Afin d'obtenir un état de surface convenable, il est recommandé de prendre, au moins pour la troisième opération, un outil d'angle de direction inférieur à 30°, et à pointe fortement arrondie (analogie avec le tournage extérieur).

Le copeau taillé par l'outil au cours de ces trois opérations a une section de plus en plus petite ; les efforts de coupe diminuent dans la même proportion, et les erreurs d'usinage dues aux flexions de l'outil, de la pièce ou des supports sont ainsi amoindries.

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE L'ALÉSAGE

a) Pièce :

Les opérations d'alésage peuvent être prévues sur des pièces de toutes dimensions, de la plus petite bague au palier du bâti de machine de plusieurs tonnes. La longueur à aléser sur une ou deux portées (alésage en ligne), peut dépasser le mètre.

b) Machines :

L'usinage d'une surface cylindrique par action d'un outil sur la pièce nécessite un mouvement de coupe (rotation), et un mouvement d'avance (translation). Conformément à la règle générale d'usinage, on s'efforcera de mettre en mouvement l'ensemble le plus léger : cette règle s'applique tout particulièrement au mouvement rapide qui peut produire des effets d'inertie importants.

Le tableau ci-dessous définit les possibilités de réalisation des alésages :

Mouvement de coupe	Mouvement d'avance	Machine
Pièce	Outil	Tour
Outil	Pièce	Tour équipé en aléseuse. Fraiseuse. Aléseuse horizontale de petite capacité.
Outil	Outil	Perceuse. Aléseuses de toutes capacités verticales ou horizontales.

c) Outils.

Ils sont de deux types :

outils de forme, dérivés du foret : alésoirs,

outils à tranchant unique, dérivés de l'outil de tour : outils montés sur barres d'alésage.

d) Opérations d'alésage.

Nous savons que la qualité d'un usinage est compromise par :

— l'usure de l'outil en cours de travail,

— la flexion de l'outil, ou de la pièce, ou de leurs supports, sous l'action des efforts de coupe.

La précision exigée pour un alésage est généralement grande et, malheureusement, la rigidité d'un outil pénétrant dans un trou de grande longueur est toujours limitée.

Aussi est-il nécessaire :

a) de prévoir une opération de finition avec un outil spécialement conçu pour ce travail ; la profondeur de passe sera légèrement supérieure à celle qui donnerait le copeau taillé minimum (0,05 à 0,1 mm). Ainsi, l'usure de l'outil et les flexions des différents organes seront-elles minimum, et l'état de surface, comme la cote de l'alésage, seront obtenus avec la précision recherchée.

b) de préparer l'action de l'outil de finition par une passe dite de demi-finition. L'outil de demi-finition aura pour rôle :

1° d'assurer la mise en position de l'axe de l'alésage,

2° de réaliser, avec le maximum de précision, la rectitude de l'axe et des génératrices de l'alésage.

Ces conditions supposent une section de copeau assez faible : profondeur de pase 0,5 à 1 mm, avance par tour 0,2 à 0,3.

c) ébaucher le trou, au foret, ou à l'outil à tranchant unique.

En résumé, les opérations d'alésage comportent, en principe : une ébauche, une demi-finition, une finition.

ÉTUDE DES OPÉRATIONS ET DES OUTILS D'ALÉSAGE

A. — Alésage à l'outil de forme

1° Outils de forme.

Les alésoirs : constitution, mode d'action.

Nous avons vu qu'en raison de leur flexibilité les forets ne permettent pas un travail précis. Les alésoirs, comme eux, travaillent en bout et comportent des rainures pour le dégagement des copeaux, mais leur pénétration ne s'effectuant pas en pleine matière les rainures sont moins profondes, mais plus nombreuses (3 à 12). La partie centrale du noyau est plus importante que l'âme du foret de même diamètre ; l'alésoir est, pour cette raison, un outil plus rigide, car il est également beaucoup plus court. On construit des alésoirs pour l'ébauche, pour la demi-finition et pour la finition. Quel qu'en soit le type, un alésoir comporte toujours deux parties essentielles :

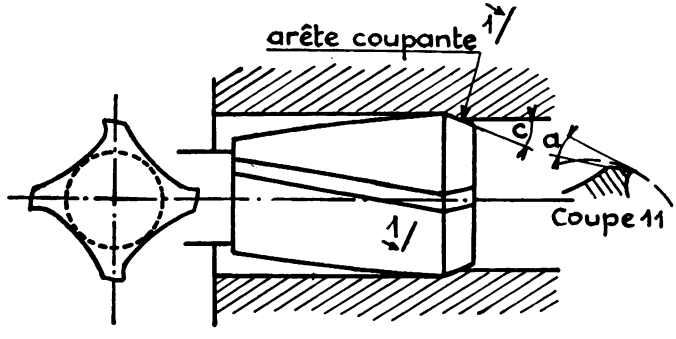


Fig. 2. — Alésoir en bout. Mode d'action.

a) *la partie active* conique à son extrémité. Les dents qui y sont formées constituent de véritables outils de coupe qui doivent être affûtés en donnant à l'angle de dépouille une valeur de 1° à 5° (*fig.* 2 et 3).

L'angle $\widehat{c}$ du cône d'action n'est autre que l'angle de direction défini pour l'outil de tournage ; on lui donne une valeur en fonction de l'état de surface désiré. Pour l'ébauche et la demi-finition :

$$\widehat{c} = 60° \text{ à } 30° ; \qquad \text{pour la finition : } \widehat{c} = 2° \text{ à } 5°.$$

b) *Une partie guide.*

Le listel correspondant à chaque dent n'est pas affûté. Cette partie est rectifiée avec une très légère conicité vers l'arrière pour éviter le frottement des dents sur la surface usinée. On admet pour sa valeur : $2{,}5 \times 10^{-4}$ mm (correspondant

à une différence de diamètre égale à $\frac{2,5}{100}$ mm pour une longueur d'outil de 100 mm).

L'alésoir est un outil de précision.

On mesure plus facilement son diamètre si ses tranchants sont en nombre pair.

2° Principaux types d'alésoirs.

a) *Alésoir d'ébauche.*

L'alésoir d'ébauche est une sorte de foret hélicoïdal à trois ou quatre rainures (*fig.* 2). Son emploi constitue une étape vers la précision, en rectitude et en position, de l'axe de l'alésage.

On l'utilise pour terminer une ébauche réalisée au foret ou, surtout, pour approcher de la cote finale un trou venu de fonderie.

b) *Alésoir demi-finisseur ou alésoir en bout.*

Rôle.

Cet outil est utilisé pour former un trou de diamètre inférieur de 0,2 à 0,3 mm à la cote nominale. Il doit :

— donner la précision imposée pour la rectitude et la position de l'axe ;

— fournir une surface sans autre défaut que des stries circulaires, de l'ordre de grandeur de celles que laisserait l'outil de tour d'alésage.

Mode d'action et forme de l'outil.

L'alésoir en bout enlève peu de métal : profondeur de passe comptée sur le rayon égale à 1 mm au maximum. Ses rainures, au nombre de 4 ou 6, sont taillées en hélice, avec un pas de 10 à 15 diamètres. L'angle de direction $\widehat{c}$ de la partie active vaut 45° à 60°. La longueur de la partie taillée ne dépasse guère un à deux diamètres (*fig.* 3).

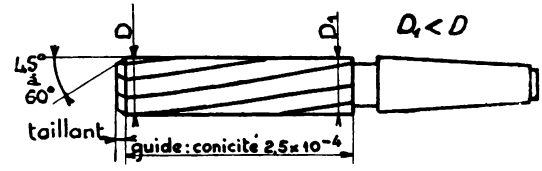


Fig. 3. — Alésoir rigide.

Les petits alésoirs sont monoblocs ; les grands sont creux et se montent, clavetés, sur une queue cylindrique ou conique ; on peut aussi les glisser sur une barre qui les entraîne au moyen d'une goupille placée suivant un diamètre, ou par deux taquets rapportés sur elle (*fig.* 4 et 5).

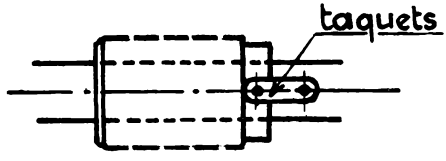


Fig. 4. — Entraînement d'un alésoir en bout.

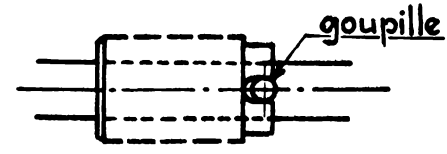


Fig. 5. — Entraînement d'un alésoir en bout.

L'alésoir de demi-finition travaille correctement si son axe de symétrie coïncide avec son axe de rotation, et s'il est suffisamment rigide pour ne pas fléchir sous l'action des efforts de coupe. Ceci suppose une fabrication et un affûtage soignés.

La liaison de l'outil et de la machine doit être très rigide.

La machine doit être également en parfait état.

c) *Alésoir de finition.*

Rôle.

L'alésoir de finition parachève le travail de l'alésoir de demi-finition ; il met le trou à la cote prévue, et réalise l'état de surface demandé.

Mode d'action et forme.

Puisque l'axe de l'alésage a déjà été défini par l'opération précédente, il importe que, pendant toute la durée du travail, l'axe de l'alésoir de finition coïncide avec celui du trou.

Deux solutions sont possibles :

1 - monter l'alésoir rigidement sur la broche de la machine. Ce montage suppose un centrage parfait de l'outil et une machine excellente ; deux conditions difficiles à satisfaire.

2 - laisser l'alésoir se centrer lui-même dans l'alésage. L'accouplement outil-broche est prévu avec un peu de jeu radial, et la poussée est transmise à l'outil, ainsi que le couple d'entraînement, au moyen d'un accouplement à la Cardan (*fig.* 6) ou montage flottant. L'alésoir se place en équilibrant les actions sur les dents de sorte que chacune d'elle, prenne un copeau de même épaisseur, ce qui assure la coïncidence des axes. Cette façon de procéder est courante.

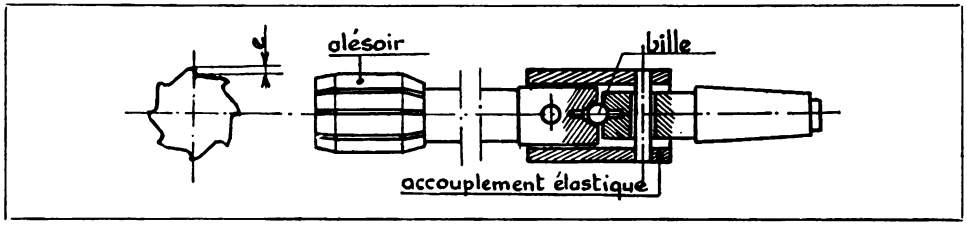


Fig. 6. — Alésoir entraîné par cardan.

Suivant leurs diamètres, ces outils ont 6, 9, 12 dents, le plus souvent droites ; la denture hélicoïdale est préférable, mais le calibrage de l'outil par affûtage devient beaucoup plus difficile ; dans ce cas l'angle d'hélice est d'environ 10°.

Le diamètre du trou obtenu dépend non seulement de celui de l'alésoir, mais aussi de la nature du métal de la pièce et des conditions de travail (lubrification notamment).

C'est par tâtonnements que l'on établit la cote de chaque alésoir pour le cas envisagé (en fabrication de série, bien entendu).

Le mode d'action de l'outil justifie la forme à donner à la partie taillée (*fig.* 7).

On y remarque :

1° un cône d'entrée (1) destiné à faciliter l'introduction de l'outil ; les dents, rectifiées, n'ont pas de dépouille.

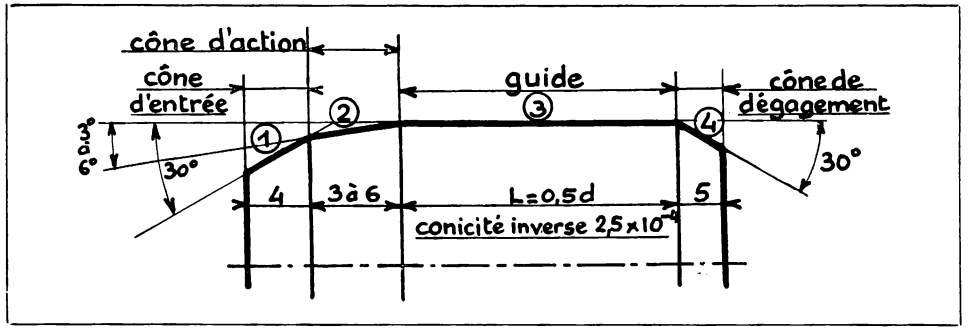


Fig. 7. — Profil d'une lèvre d'alésoir.

2° un cône d'action (2) rectifié suivant une conicité de 0,1 à 0,2 et avec une dépouille de :

1° pour l'aluminium et ses alliages,

2° à 3° pour les aciers et la fonte grise,

3° à 4° pour la fonte dure et le bronze.

3° un guide (3) rectifié sans dépouille, suivant une conicité inverse de $2{,}5 \times 10^{-4}$. Cette partie sert à guider l'alésoir au fur et à mesure de son avance dans le trou usiné.

4° un cône de dégagement (4) rectifié sans dépouille afin que le talon des dents ne raye pas la pièce quand on retire l'alésoir.

L'affûtage des alésoirs de finition est très délicat. Le diamètre de l'alésoir dépend de la tolérance à obtenir. La tolérance d'exécution sur le diamètre de l'alésoir est les 2/3 de la tolérance prévue pour l'alésage. *Exemple :*

Diamètre de la pièce : 60 H7 $= 60^{+30}_{\ 0}$.

Diamètre de l'alésoir : 60^{+30}_{+20}.

d) *Alésoirs expansibles.*

Les alésoirs à lames rapportées sont utilisés pour les trous de grandes et moyennes dimensions. (On a réalisé des alésoirs de 1 m de diamètre). Les lames sont rapportées sur des « tourteaux », en acier mi-dur pour les cotes moyennes, et en acier coulé pour les grandes.

Ces alésoirs sont généralement expansibles : on peut augmenter leur diamètre pour les réaffûter ; ils peuvent ainsi supporter de nombreux affûtages jusqu'au moment où l'on doit remplacer leurs lames. Celles-ci sont en acier à coupe rapide, ou même en carbures métalliques frittés. Les carbures peuvent prendre une très grande finesse

d'arête (morfilage à la pierre India Kansas) qu'ils conservent longuement ; on peut obtenir ainsi de nombreuses pièces avec un très bel état de surface.

e) *Utilisation des alésoirs.*

Le prix de revient des alésoirs est élevé. Ils sont utilisés surtout pour des travaux de série sur machines à percer et sur tours à décolleter. Ils dispensent de tout réglage sur les machines, que l'on peut alors confier à de simples ouvriers spécialisés (O.S.). On réalise ainsi une économie de main-d'œuvre. Dans l'établissement du prix de revient des travaux d'alésage, il faut considérer qu'un alésoir en acier rapide ne peut faire que 2 à 300 coupes entre affûtages, et qu'un alésoir de finition ne peut être réaffûté que 3 à 4 fois s'il est taillé dans la masse.

Avance par tour.

L'usure des alésoirs par perte de diamètre étant sensiblement proportionnelle au nombre de tours faits au contact de la pièce, on choisit l'avance maximum compatible avec l'épaisseur limite du copeau. De l'étude générale des conditions d'usinage, on tire l'avance par tour de la relation :

$$a \geqslant \frac{0{,}05}{\sin 3 \text{ à } 6^{\circ}} = 1 \text{ ou } 0{,}5 \text{ mm si l'épaisseur limite du copeau} = 0{,}05.$$

MATIERES	VITESSE DE COUPE EN M/MN	AVANCE MINIMUM EN MM PAR TOUR, SUIVANT DIAMETRE			LUBRIFIANT
	acier à coupe rapide	$\phi < 20$	$20 < \phi < 50$	$50 < \phi$	
Acier au C :					Huile de colza.
(Rr). < 600 N/mm² (1)	10 à 15	0,2 à 0,4	0,4 à 0,6	0,6 à 1	Suif.
(Rr). < 900 N/mm²	6 à 10				Huile soluble.
Acier allié :					Huile de Colza.
recuit	8 à 12	0,1 à 0,3	0,3 à 0,5	0,5 à 0,8	Suif.
traité	6 à 8				Huile soluble.
Fonte douce	10 à 16	0,3 à 8	0,8 à 1,5	1,5 à 2	A sec ou huile soluble.
Acier coulé	6 à 12	0,1 à 0,3	0,3 à 0,5	0,5 à 0,8	A sec ou huile soluble.
Bronze	6 à 12	0,2 à 0,4	0,4 à 0,6	0,6 à 1	A sec ou huile de colza.
Laiton	20 à 30	0,3 à 0,5	0,5 à 1	1 à 2	A sec ou huile de colza.
Alliages légers	20 à 40	0,3 à 0,5	0,5 à 1	1 à 2	Pétrole. Essence de térébenthine. Huile soluble.

D'après *Utilisation rationnelle des outils coupants*, par R. Besnard.

Réglage de la position de l'axe des alésages.

L'alésoir de demi-finition doit situer l'axe du trou. Pour les travaux unitaires, la mise en place de l'alésoir de demi-finition se fait à l'aide du comparateur. Lorsque l'alésage doit être exécuté en série, les pièces sont placées dans un montage ; l'alésoir de demi-finition est guidé par une bague amovible en acier traité. On ôte cette bague pour présenter l'alésoir finisseur qui, monté flottant, n'est pas guidé.

(1) Rappelons que 1 kgf/mm² = 10 N/mm².

3° La lame plate.

1° *Étude de l'outil.*

Pour des travaux de petites séries, on emploie parfois les lames plates (véritables alésoirs à deux lèvres), en raison du prix élevé des alésoirs, difficile à amortir.

La lame de demi-finition peut être solidaire de son entraîneur (*fig.* 8) ; le plus souvent elle est placée, comme la lame de finition, dans la lumière d'une barre d'entraînement. Elle peut être montée libre ou bloquée (*fig.* 9*a*-9*b*). Lorsqu'elle est libre, il faut l'affûter sur un montage spécial, ou la bloquer sur

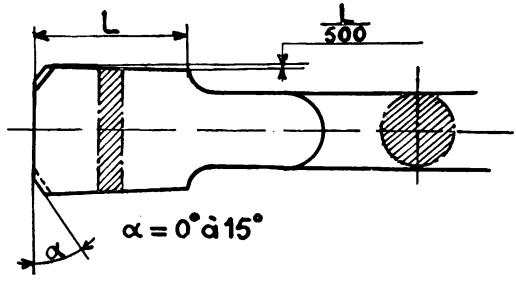


Fig. 8. — Lame à manche pour alésage.

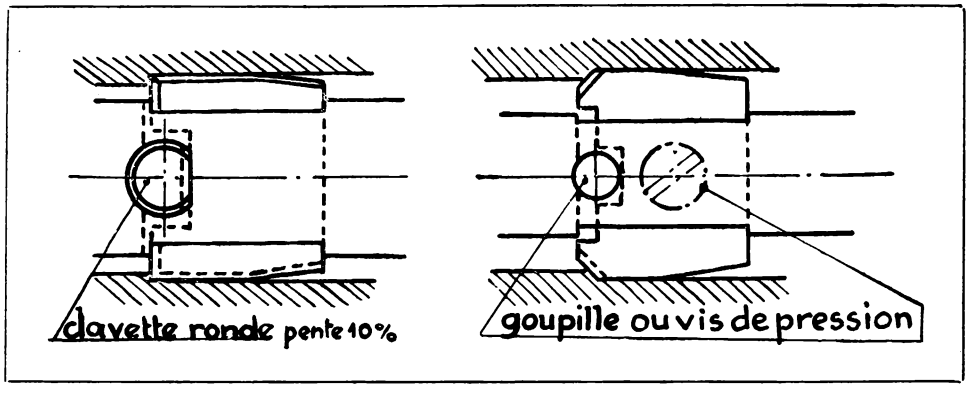


Fig. 9 *a* et *b*. — Fixation des lames plates.

la barre au moyen d'une vis de pression. De plus en plus, les lames plates sont remplacées par des outils ronds (petites barres cylindriques), dont les logements et l'ajustement sont plus faciles à réaliser. On utilise alors le clavetage rond standard : deux trous sécants, l'un pour l'outil, l'autre pour la clavette de blocage.

2° *Mode d'action.*

Il est difficile d'obtenir la même finesse d'affûtage des deux arêtes : la mieux affûtée tend à couper davantage et les efforts qu'elle subit sont alors plus importants. La lame a donc sa vitesse freinée sur l'arête la

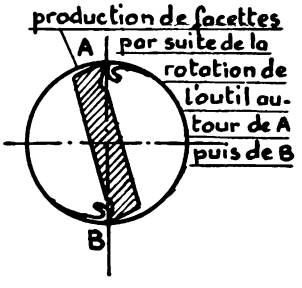


Fig. 10. — Phénomène du polygonage.

plus tranchante, et elle a tendance à tourner autour de celle-ci. Il peut se produire une série de pivotements de faible amplitude à chaque tour complet de la lame, ce qui engendre des facettes à l'intérieur de l'alésage, produisant un trou polygoné (*fig.* 10). Aussi préfère-t-on utiliser les lames à un seul tranchant.

B. — Alésage à l'outil d'enveloppe

a) Étude de l'outil. Fixation. Réglage.

Nous avons vu que l'on peut obtenir au tour, avec l'outil à tranchant unique, un alésage court ($l < 25$) dans les qualités 6, 7 ou 8. L'expérience montre que les déformations des différents organes, sous l'action de l'effort de coupe, rendent la précision

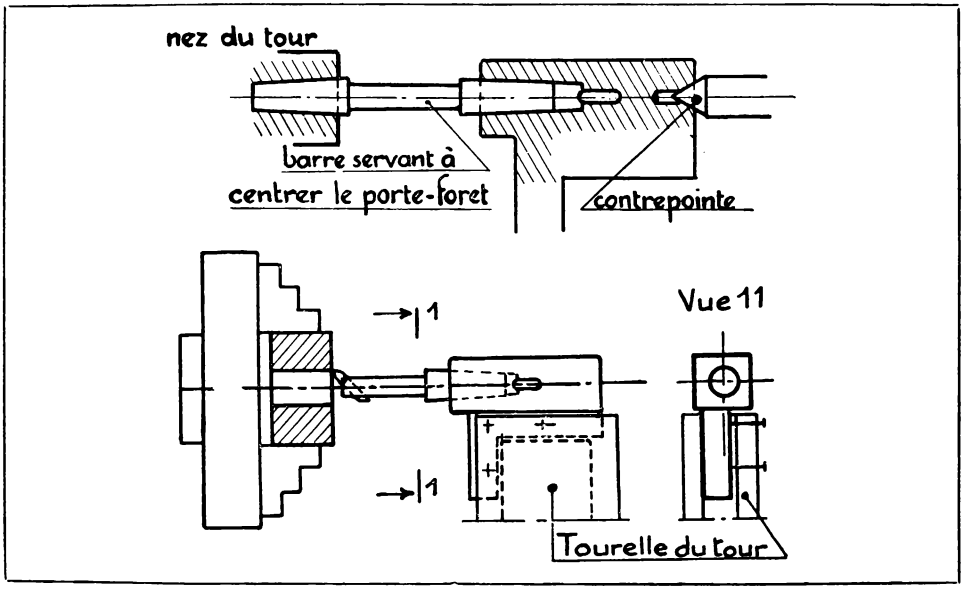
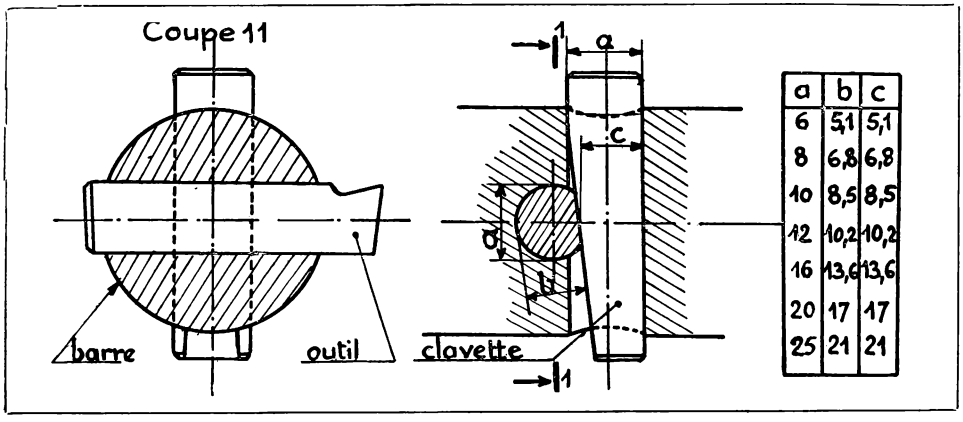


Fig. 11. — Alésage sur le tour : outil sur tourelle.

difficile à obtenir. Cependant, l'outil est bon marché et facile à régler. Cela explique le développement qu'il a pris dans les travaux d'alésage, sous la forme d'un petit outil cylindrique rapporté sur une barre, également cylindrique, à laquelle on donne le diamètre maximum compatible avec le trou ébauché. On accouple cette barre avec un support, fixé sur la tourelle carrée, grâce à un emmanchement au cône Morse (*fig.* 11). De plus en plus souvent, ce petit outil est à mise rapportée en carbure métallique. Sur le tour, cet outil ne reçoit que le mouvement d'avance ; sur d'autres machines, il a le mouvement de coupe, ou même les deux. Quand on l'utilise sur le tour, le

réglage s'obtient par déplacement de la barre parallèlement à l'axe de l'alésage ; sur les machines à aléser, on déplace l'outil sur la barre elle-même.



a	b	c
6	5,1	5,1
8	6,8	6,8
10	8,5	8,5
12	10,2	10,2
16	13,6	13,6
20	17	17
25	21	21

Fig. 12. — Outil rond et clavetage standards.

La *figure* 12 montre le mode de liaison normalisé de l'outil et de la barre ; mais on fixe très souvent aussi l'outil au moyen d'une vis de pression, et on le règle avec une vis de poussée (*fig.* 13).

Lorsque l'outil est animé du mouvement de rotation, il faut nécessairement que l'axe de la broche et celle du trou en alésage coïncident : un réglage de position précis est indispensable.

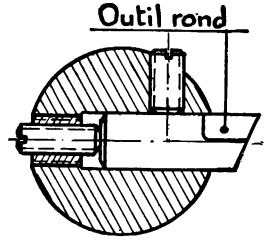


Fig. 13. — Montage d'un outil à aléser par vis ordinaires. ——▶

b) Fixation de l'outil sur la barre.

1° *Clavette ronde tangente.*

Le réglage de l'outil s'effectue en frappant sur l'arrière de l'outil au moyen d'une massette, la clavette étant légèrement dépincée. Ce réglage est simple, mais un peu délicat, et doit être confié à un ouvrier qualifié.

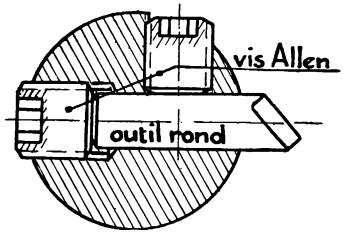


Fig. 14. — Montage d'un outil à aléser par vis Allen.

2° *Vis de pression et vis pousse-grain.*

La vis de pression est maintenant le plus souvent une vis à « six pans » imprimés (vis Allen). La vis pousse-grain est du même type. L'avantage de ces vis est qu'elles ne font pas saillie sur la barre, dont le diamètre peut donc être augmenté, et que la clé, simple barre hexagonale, permet un serrage énergique (*fig.* 14).

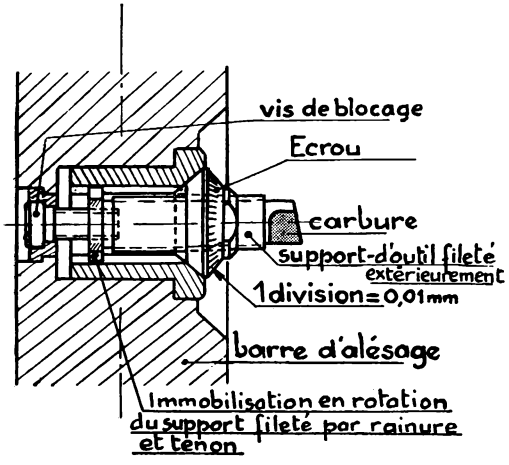


Fig. 15. — Porte-outil Microbore.

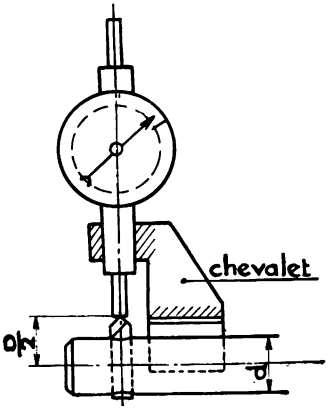


Fig. 16. — Réglage d'une barre avec comparateur et calibre.

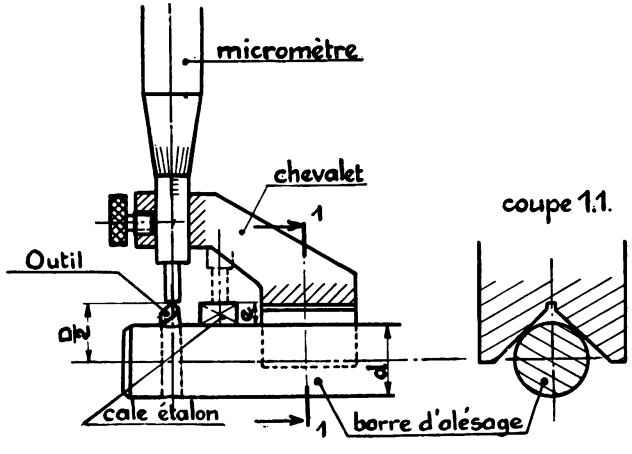


Fig. 17. — Réglage d'une barre avec micromètre et cales.

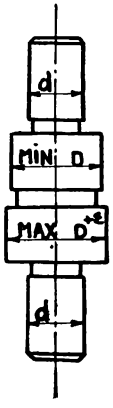


Fig. 18. — Calibre de réglage pour comparateur (*fig.* 16).

3° *Outil à réglage micrométrique.*

La *figure* 15 représente l'outil MICROBORE. Une vis micrométrique portant un tambour gradué permet le réglage précis : quelques microns. L'outil est à mise rapportée en carbure ou en diamant.

Ces outils se répandent dans les fabrications de haute qualité.

c) Contrôle du réglage de l'outil.

Le contrôle du réglage de l'outil doit être précis. On se sert d'un comparateur à cadran sur chevalet en forme de vé (*fig.* 16-17), que l'on appuie sur la barre d'alésage. Le réglage de la touche du comparateur s'opère à l'aide de cales étalons, ou d'un tampon de contrôle maxi-mini (*fig.* 18).

Quand le réglage est fréquent, et toujours sur la même cote, on préfère utiliser un micromètre pneumatique SOLEX, accouplé à un chevalet de contrôle que montre la *figure* 19. C'est ainsi qu'a été assuré le réglage des barres d'alésage employées pour réaliser les portées du vilebrequin de la 4 ch Renault.

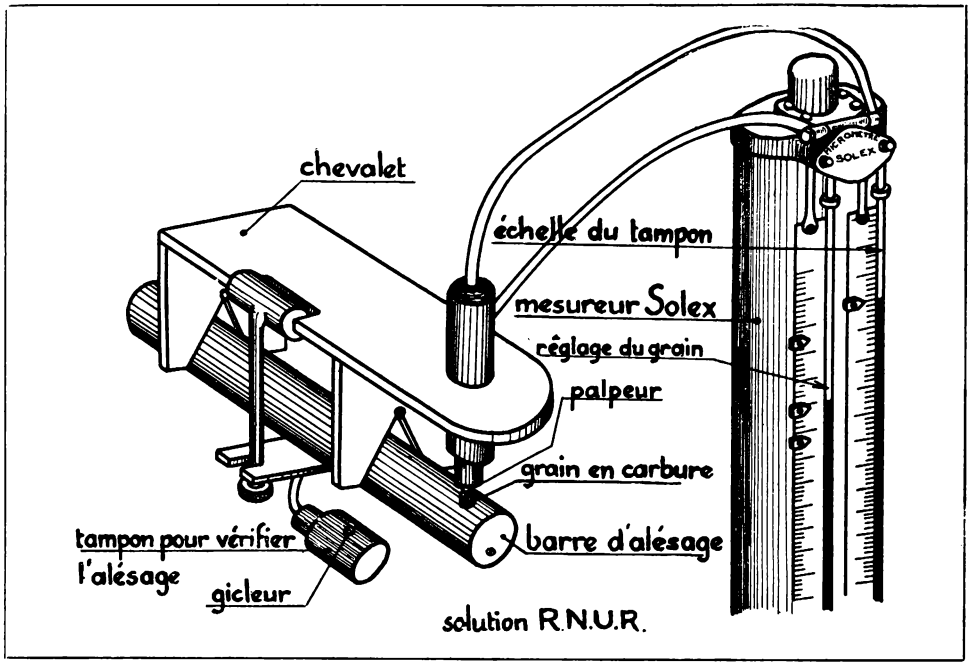


Fig. 19. — Réglage d'un grain avec comparateur Solex.

Quand on règle les outils d'une barre d'alésage, il faut tenir compte des flexions de la barre pendant le travail.

EXÉCUTION DES ALÉSAGES

Les erreurs d'alésage dues à la flexion des barres. Étude expérimentale. Montage des barres d'alésage. Les machines à aléser. Gamme d'opérations en alésage.

Erreurs d'alésages dues à la flexion des barres.

a) *Efforts s'exerçant sur une barre.*

Imaginons une barre d'alésage montée sur une broche, avec outil en porte-à-faux (*fig.* 20). Le mouvement d'avance de la pièce par rapport à l'outil est supposé dirigé de droite à gauche. Les composantes des efforts de coupe, action de la pièce sur l'outil, sont F_a, F_p F_c. Elles sont équilibrées à tous les instants par l'action de la poulie motrice (couple C_m), et les actions de contact Rî et Rî des paliers sur la broche.

Ramenons les efforts F sur l'axe, en ajoutant les couples de déplacement.

Le déplacement de F_c fait apparaître le couple résistant C_1 équilibré par le couple moteur C_m.

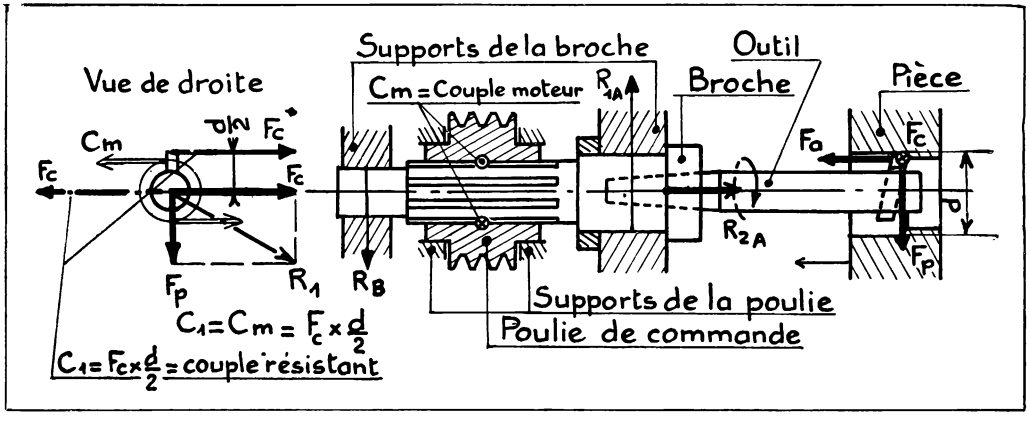


Fig. 20. — Efforts pendant l'alésage.

Ainsi, entre F_c et C_m, la broche et la barre sont sollicitées à la torsion. Les déformations correspondantes ne nuisent pas outre mesure à la qualité de l'usinage. Les forces F_c et F_p admettent, sur l'axe, une résultante R_1 qui provoque la flexion de l'ensemble broche-barre. Cette flexion est la principale cause des erreurs d'alésage.

La force F_a sollicite la barre au flambage excentré. L'expérience a montré que les déformations correspondant à cet effort sont pratiquement négligeables lorsque l'outil est monté directement sur la barre.

En résumé, l'équipage broche-barre fléchit sous l'action de la résultante R

des efforts de coupe de pénétration F_c et F_p, contenus dans le plan passant par le point d'application de l'effort de coupe, et perpendiculaire à l'axe de la barre.

b) ***Étude expérimentale des déformations prises par l'ensemble broche-barre.***

Réalisons le dispositif expérimental représenté par la *figure* 21. La résultante normale des efforts de coupe R est remplacée par l'action d'une vis micrométrique ; la mesure de cet effort est effectuée à l'aide d'un anneau

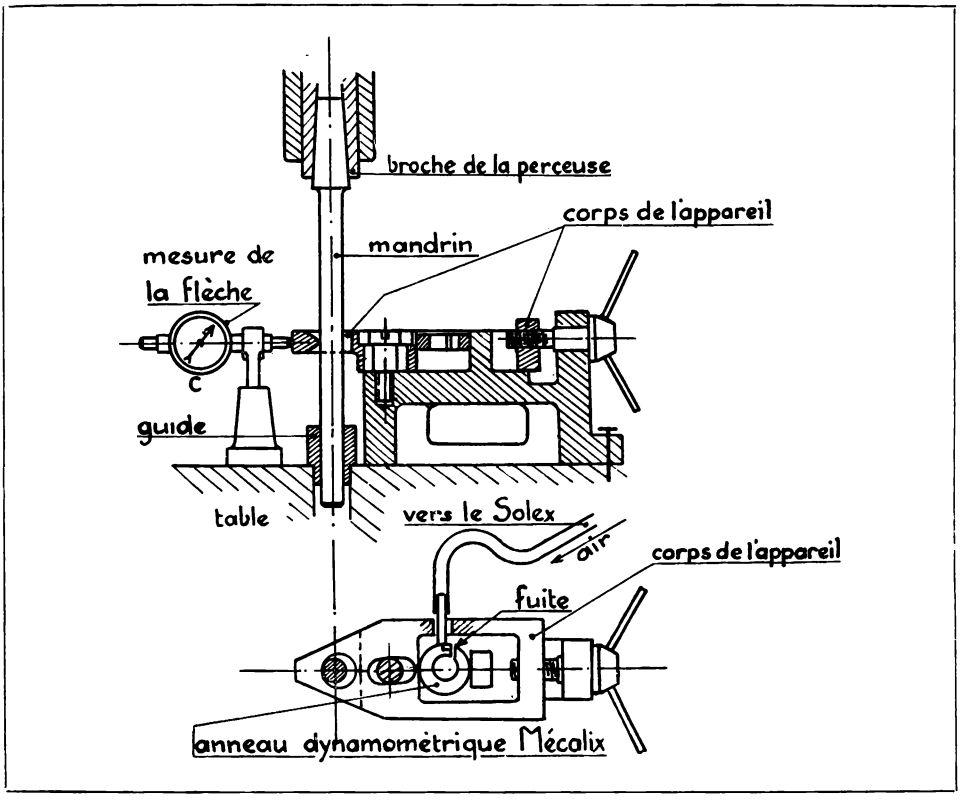


Fig. 21. — Étude d'une barre d'alésage. Expérimentation.

dynamométrique en acier dur traité et préalablement étalonné. Cet anneau est lié à un micromètre SOLEX, dont la graduation est établie en kilogrammes-forces, ou en Newtons.

La flèche de flexion de l'ensemble broche-barre est contrôlée par le comparateur à cadran.

Le dispositif expérimental est monté sur une machine à percer de capacité moyenne (une radiale de préférence).

● Première série d'expériences sur barre en porte à faux.

— *Rappels de notions théoriques.*

La flèche prise par une barre encastrée (*fig.* 22), avec effort F en porte à faux, est donnée par la relation :

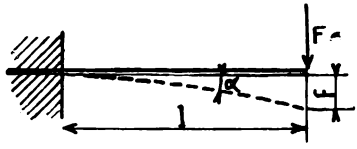


Fig. 22. — Flèche d'une barre libre à une extrémité.

$$= \frac{PL^3}{3EI}$$

E : module d'élasticité, soit 200 000 N/mm² ou 2×10^5 N/mm², pour les aciers.

I : moment d'inertie de la section droite de la barre $= \frac{\pi d^4}{64}$.

La flèche est donc proportionnelle au cube de la longueur, et inversement proportionnelle à la 4e puissance du diamètre.

Pour les expériences suivantes on supposera que la broche est fixe, l'effort est appliqué en divers points de la barre.

Expérience n° 1 (fig. 23).

Données. — La barre est en acier mi-dur, $d = 20$.

L'effort a pour valeur : 100 N (1).

R en position (1), on note : $f_1 = 0{,}03$.

R en position (2), on note : $f_2 = 0{,}25$.

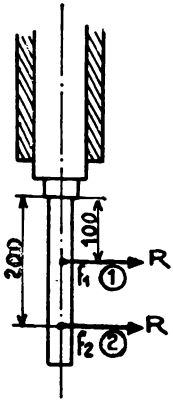


Fig. 23. — Efforts sur barre en porte à faux.

La longueur utile ayant doublé, la flèche a augmenté considérablement $f_2 \simeq 8 f_1$. Théoriquement, on aurait dû trouver :

$$f_1 = 0{,}02 ; \qquad f_2 = 0{,}16.$$

La différence enregistrée provient de la flexion supplémentaire de la broche et de son fourreau. Il en sera d'ailleurs ainsi pour toutes les autres expériences.

Conclusion pratique. — La barre d'alésage doit avoir une longueur utile la plus petite possible.

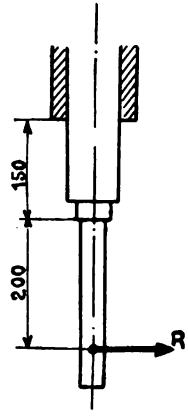


Fig. 24. — Broche de la machine en porte à faux.

Expérience n° 2.

Données. — La barre a un diamètre double $d = 40$.

L'effort R conserve la même valeur 100 N.

R en position (1), on note : $f_1 = 0{,}005$.

R en position (2), on note : $f_2 = 0{,}03$.

On constate une diminution très importante des flèches.

Conclusion. — La barre doit avoir le diamètre le plus grand possible.

Expérience n° 3.

Reprenons les conditions de l'expérience n° 1, mais doublons l'effort : R = 200 N. Les flèches doublent ; on trouve :

$$f_1 = 0{,}06 \qquad \text{et} \qquad f_2 = 0{,}5$$

Conclusion. — Si on veut réduire le plus possible les flexions de l'outil, il faut un effort de coupe minimum, donc il faut prendre une passe de finition très faible, sans toutefois atteindre le copeau minimum.

Pour un acier de construction, dont la résistance à la coupe est de 2 500 N/mm², avec une avance par tour de 0,1 et une profondeur de passe de 0,4, l'effort R a sensiblement pour valeur :

$$2\,500 \times 0{,}4 \times 0{,}1 = 100 \text{ N}.$$

Les flèches prises par l'outil sont donc sensiblement celles qui ont été enregistrées dans l'expérience.

Expérience n° 4.

Reprenons les conditions de l'expérience (1), mais en augmentant de 150 mm le porte à faux de la broche (*fig.* 24).

On constate que la flèche $f/_2$ augmente de 0,35 à 0,7. L'effort F = 100 N peut représenter l'effort de coupe d'un outil d'alésage. On en conclut que l'alésage obtenu en déplaçant la broche et son fourreau n'est pas parfaitement cylindrique (*fig.* 25).

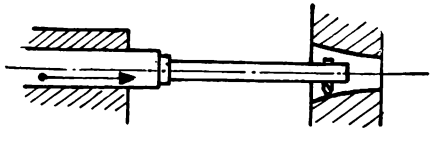


Fig. 25. — Alésage en porte à faux par déplacement de la barre.

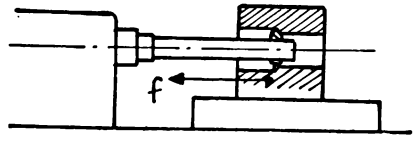


Fig. 26. — Alésage en porte à faux par déplacement de la pièce.

Si l'outil et son support ont une longueur fixe, l'alésage est sensiblement cylindrique à condition que l'effort de coupe soit constant pendant toute la durée de la course, et que le mouvement d'avance soit rectiligne. Application au travail sur le tour et sur l'aléseuse avec déplacement de la pièce (*fig.* 26).

Expérience n° 5.

Reprenons les conditions de l'expérience (1), mais soutenons la barre par un emmanchement cylindrique à la partie inférieure (*fig.* 27).

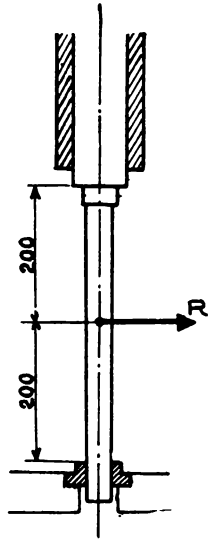


Fig. 27. — Barre guidée en bout.

ÉTUDE THÉORIQUE.

La flèche prise par une barre supportée à ses deux extrémités et de longueur 2 L a pour valeur :

$$= \frac{P}{3EI} \times \frac{L_1^2 \times L_2^2}{2L}$$

Si $L_1 = L_2 = L$ la flèche maximum a pour valeur:

$$f = \frac{PL^3}{6EI}$$

Cette flèche (*fig.* 28) est nulle au droit des appuis, et son maximum est égal à la moitié de la flèche d'une barre de longueur L, supportant une force P en porte à faux. Si les appuis sont des encastrements, la flèche est six fois plus petite.

Expérimentations :

Pour $L_1 = L_2 = 200$, $f_2 = 0{,}15$,

Pour $L_2 = L_1 = 100$, $f_1 = 0{,}02$.

Barre acier mi-dur $d = 20$ P = R = 100 N,

valeurs sensiblement plus réduites que dans le cas de l'outil en porte à faux, où

$f_2 = 0{,}25$ quand L = 200

et $f_1 = 0{,}03$ quand L = 100.

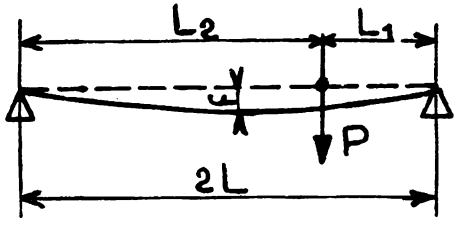


Fig. 28. — Flexion d'une barre sur deux appuis.

CONCLUSIONS

- Si on soutient la barre d'alésage en deux endroits, les flèches prises sont diminuées au moins de moitié par rapport à ce qu'elles seraient si l'outil était en porte à faux.

La flèche prise par la barre est nulle lorsque l'outil est près des appuis, et maximum lorsqu'il est au milieu. Ainsi, quand l'alésage s'obtient par déplacement de la barre, la surface usinée n'est pas exactement cylindrique (forme de diabolo) (*fig.* 29). Si *d* est le diamètre aux extrémités, où la flèche de la barre est nulle, le diamètre au milieu

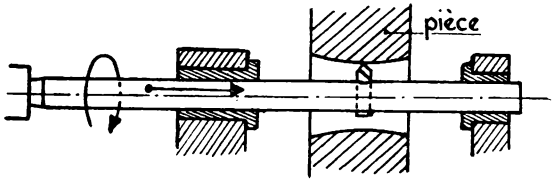


Fig. 29. — Alésage en « diabolo » par déplacement de la barre.

sera $d' = d - 2f$, f étant la flèche prise par la barre. Si, au contraire, l'avance est donnée à la pièce, la flexion de la barre est constante et l'alésage est bien cylindrique ; par contre, la distance entre les appuis est grande, le montage plus encombrant et la barre, plus longue également, est plus difficile à fabriquer (*fig.* 30).

Pour diminuer l'importance des erreurs d'usinage, il faut limiter la flèche prise par la barre. Or, f est proportionnelle au cube de la distance des appuis et inversement proportionnelle à la quatrième puissance du diamètre de la barre ; il faut donc rapprocher les appuis le plus possible et prendre la barre de diamètre maximum.

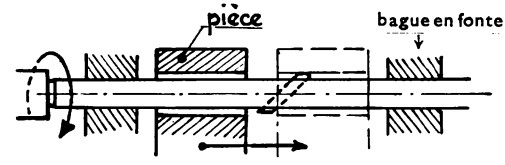


Fig. 30. — Alésage correct par déplacement de la pièce.

D'autre part, la flèche diminue si les paliers soutenant la barre sont assez longs pour donner à l'assemblage barre-support les qualités d'un demi-encastrement. On fait les bagues en fonte et leur longueur est, en général, égale à une fois et demie leur diamètre.

MONTAGE DES BARRES D'ALÉSAGE

Une barre d'alésage doit tourner bien rond ; elle doit donc être parfaitement cylindrique, et ses supports doivent être rigoureusement alignés. On la rectifie soigneusement et on limite de préférence à deux le nombre des appuis, car il serait extrêmement difficile d'en aligner trois avec toute la précision souhaitable. On peut monter la barre de deux façons différentes :

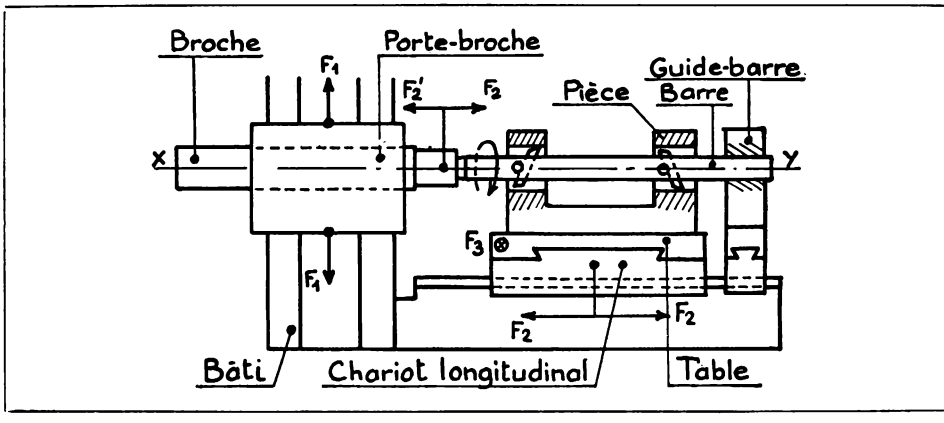


Fig. 31. — Travail sur aléseuse, barre à liaison rigide.

a) *Accouplement rigide de la broche et de la barre* (*fig.* 31).

On peut donner l'avance soit à la barre (flèche F'_2), soit à la pièce (flèche F_2) ; l'ensemble broche-barre, rigide, ne doit admettre qu'un seul axe de rotation xy ; or, il est supporté par trois paliers : deux sur la tête porte-broche et

le troisième sur le guide-barre. Les deux premiers paliers, dont la position est fixe, définissent l'axe *xy*. Il faut donc que le troisième support soit réglable ; sur les machines à aléser il est placé sur un montant, et on peut, l'aligner sur certaines machines, avec l'aide d'un appareil optique : lunette d'alignement.

La mise en position de l'alésage se fait par déplacement des chariots supports d'outil et de pièce suivant trois directions : F_1, F_2, F_3, perpendiculaires ; le contrôle des déplacements se fait au moyen de piges calibrées en longueur.

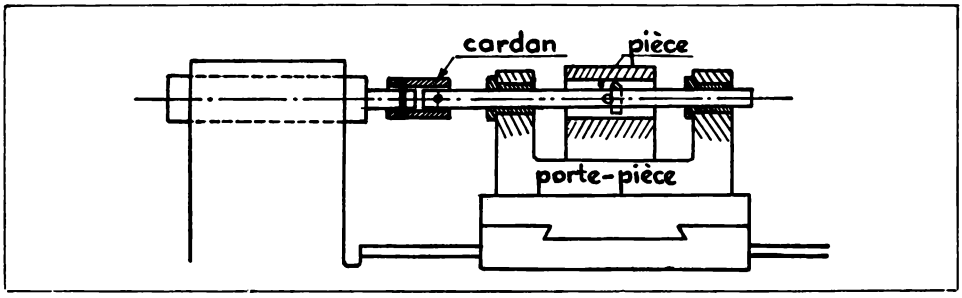


Fig. 32. — Travail sur aléseuse, barre à liaison articulée.

b) *Accouplement « flottant » (fig.* 32).

Pour les travaux de série, la position des trous à aléser est définie par un porte-pièce où la direction de la barre d'alésage est déterminée par ses supports, correctement alignés. L'accouplement de la barre ne peut être rigide, car, alors, l'ensemble broche-barre serait porté par quatre paliers ! On utilise dans ce cas un manchon articulé, genre joint de Cardan, avec jeu radial sur la broche et sur la barre : c'est le montage flottant.

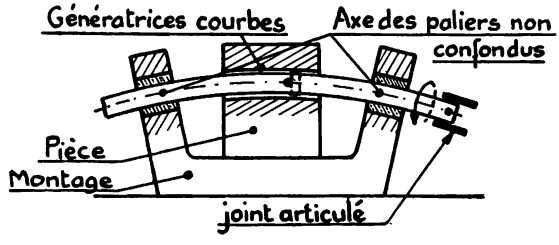


Fig. 33. — Trou cintré : mauvais guidage de la barre.

c) *Erreurs d'alésage provenant d'un mauvais montage des barres.*

Si les axes des supports de barre ne sont pas parfaitement alignés, la barre se déforme au montage et l'alésage n'a plus ses génératrices rectilignes (*fig.* 33). Une barre d'alésage doit tourner très facilement lorsqu'elle est placée en position de travail.

Le même défaut d'usinage peut se produire lorsque la barre est montée rigide dans le

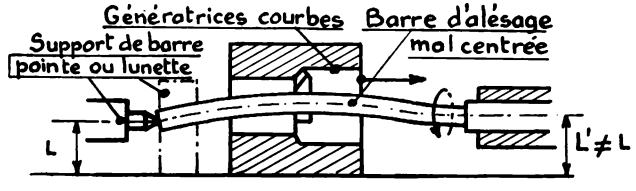


Fig. 34. — Barre à lunette mal centrée.

nez de la machine, et soutenue à son extrémité par une lunette. Le réglage de la lunette doit être soigné (*fig.* 34).

LES MACHINES A ALÉSER

Toutes les machines possédant une broche, un support d'outil ou de pièce animés d'un mouvement de rotation et d'avance, permettent l'alésage : tour, machines à percer, fraiseuses.

Alésage au tour *(fig. 35, 36, 37, 38).*

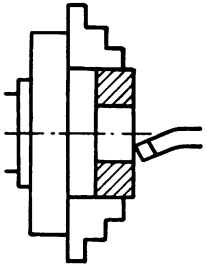


Fig. 35. — Alésage sur le tour à l'outil à aléser.

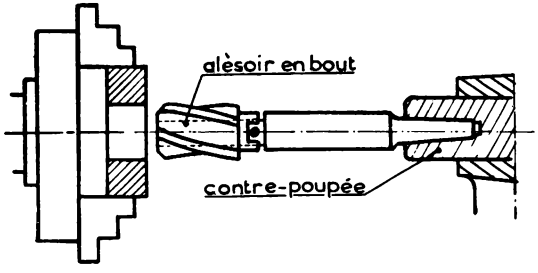


Fig. 36. — Alésage sur le tour à l'alésoir en bout.

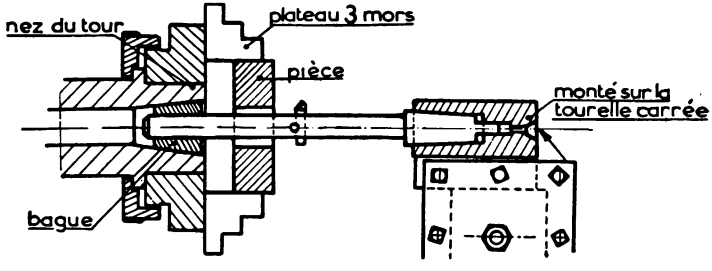


Fig. 37. — Alésage sur le tour : barre sur tourelle carrée.

Le tour est utilisé pour des pièces de petites dimensions, pouvant être mises en rotation, et dont les alésages sont relativement courts. On peut augmenter les possibilités du tour en lui apportant les modifications illustrées par la *figure* 38.

Le lecteur consultera l'ouvrage de tournage de GOUPIL (1) pour plus de détails sur cette question.

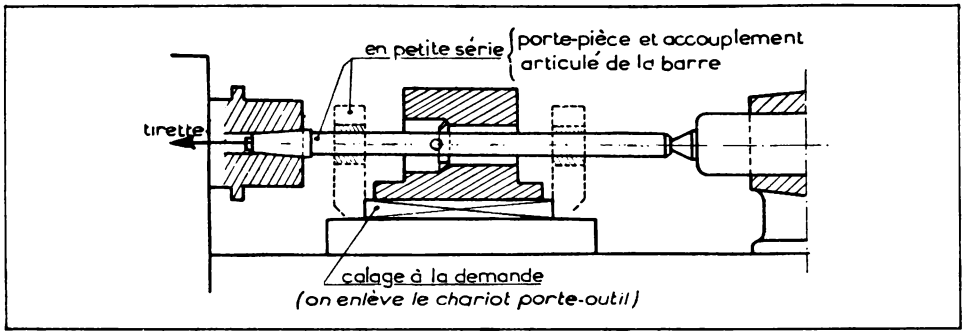


Fig. 38. — Tour transformé en aléseuse.

Alésage à la machine à percer.

Les perceuses à colonne, et surtout les radiales, sont couramment utilisées pour les travaux d'alésage à l'alésoir, à l'outil à tranchant unique monté sur une barre engagée

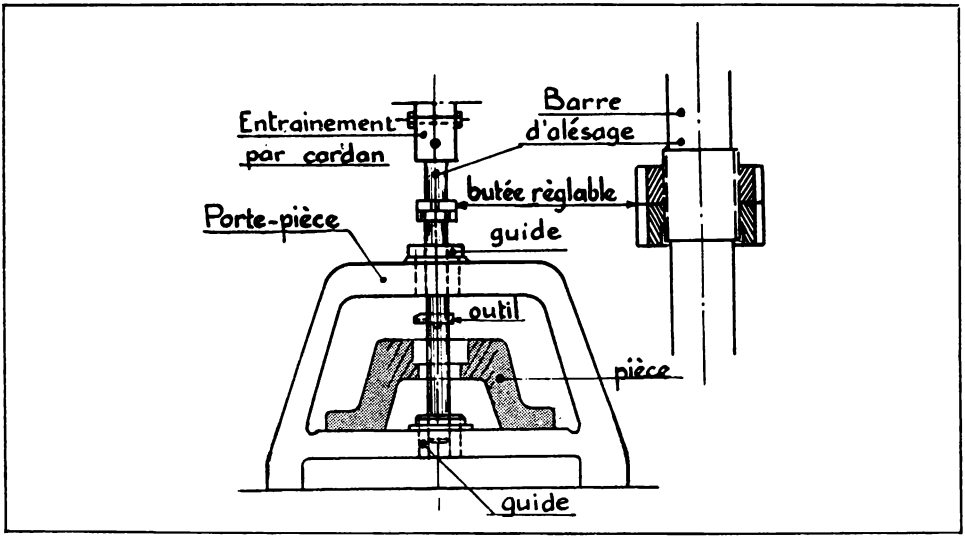


Fig. 39. — Alésage sur machine à percer radiale.

simplement dans la broche. On peut aussi guider la barre au moyen d'un palier d'extrémité monté sur la table ou, enfin, ne demander à la machine que d'entraîner la barre accouplée par cardan et guidée par les paliers d'un porte-pièce spécial (*fig.* 39).

(1) Foucher, Éditeur.

Alésage à la machine à fraiser.

On peut employer cette machine pour des alésages plutôt courts, dans des pièces de petites et moyennes dimensions. L'arbre porte-fraise est remplacé par une barre porte-grain ou porte-alésoir. Les *figures* 40 *a* et *b*, 41 montrent les possibilités d'emploi des fraiseuses pour aléser (consulter également l'ouvrage de fraisage de ARNAUD et ROLLET dans la même collection).

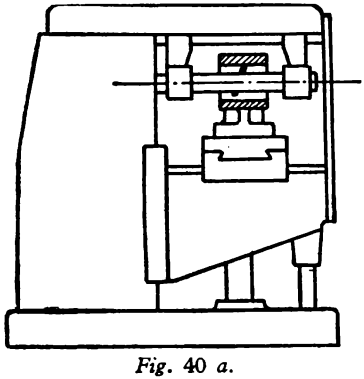


Fig. 40 *a.*

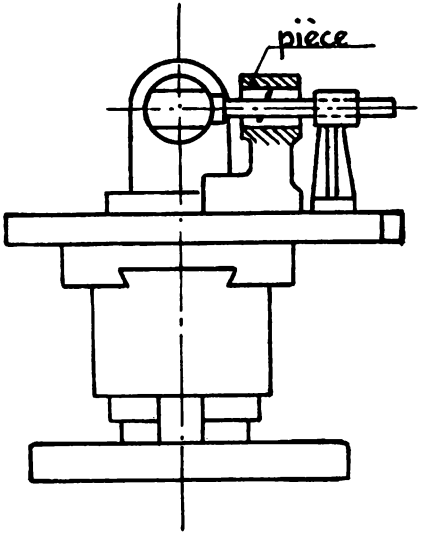


Fig. 40 *b.*

Fig. 40 *a* et *b*. — Alésage sur machine à fraiser horizontale.

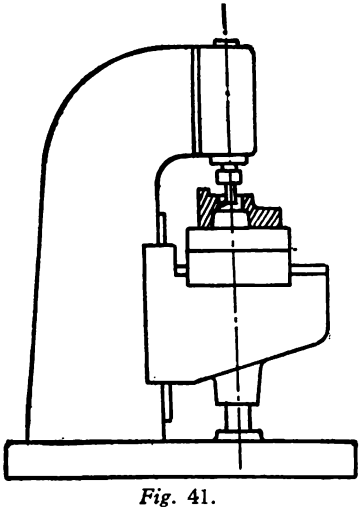


Fig. 41.

Fig. 41. — Alésage sur machine à fraiser verticale.

Alésage à la machine à aléser.

a) *Machines à table réglable en hauteur :* la broche a une position fixe dans le plan vertical.

Le type le plus simple est représenté par les *figures* 42 et 43.

La pièce est bloquée sur une table à deux chariots croisés, déplaçables au moyen d'une console qui permet le réglage en hauteur. La broche de la machine est sensitive et peut recevoir une avance manuelle ou mécanique ;

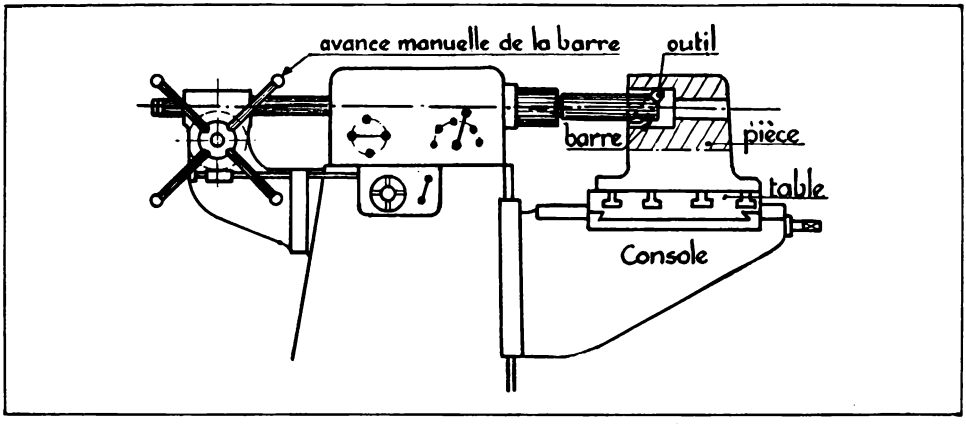


Fig. 42. — Travail sur petite machine à aléser.

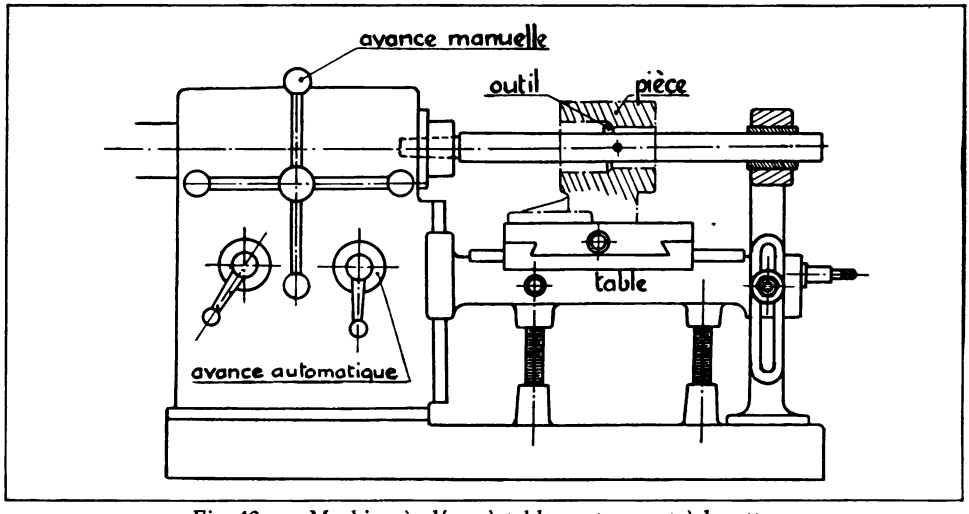


Fig. 43. — Machine à aléser à table soutenue et à lunette.

les déplacements sont évalués sur une règle graduée et sur les tambours à vernier des vis. Cette machine convient parfaitement pour les travaux unitaires et de petite série, effectués sur des pièces légères et peu encombrantes.

b) *Machines à tête réglable en hauteur.*

Elles conviennent pour les pièces lourdes : il est alors préférable de déplacer le porte-

outil plutôt que le porte-pièce, plus important. Le porte-outil peut recevoir un mouvement dans le plan horizontal et un mouvement de réglage en hauteur.

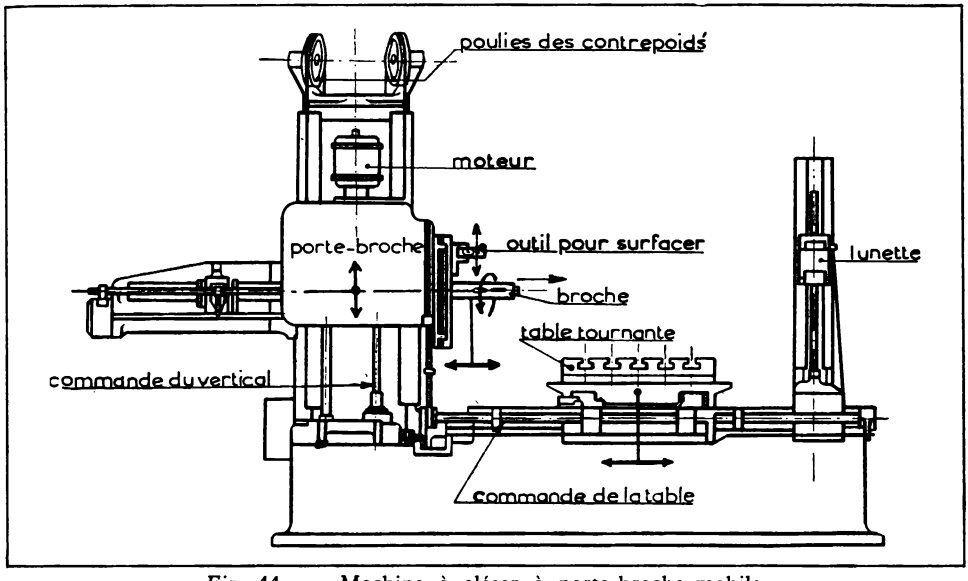


Fig. 44. — Machine à aléser à porte-broche mobile.

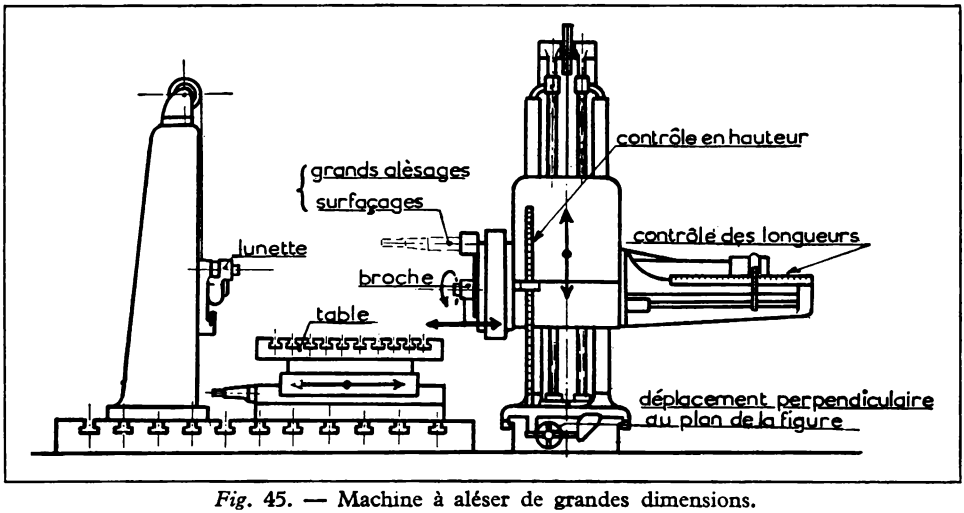


Fig. 45. — Machine à aléser de grandes dimensions.

Il existe deux types de machines. Sur le premier, la table reçoit deux mouvements : l'un parallèle à la broche, l'autre perpendiculaire à son axe (*fig.* 44). Sur le second le mouvement perpendiculaire à la broche est donné à une console porte-broche, et le mouvement parallèle à son axe est donné à la table (*fig.* 45).

Les broches de ces machines ont une avance mécanique. Sur certaines, la tête porte-broche est orientable, et l'on peut ainsi exécuter des alésages obliques. Très souvent, le mouvement d'avance de la broche lui est communiqué par une boîte de filetage : on peut donc fileter les alésages sans démontage de la pièce. Enfin, des porte-outils spéciaux permettent d'exécuter des gorges, des rainures pour circlips, et des alésages coniques (*fig.* 47).

Les aléseuses sont équipées également d'une tête, dite de surfaçage, avec laquelle on peut dresser des plans perpendiculaires à l'axe des trous (*fig.* 46).

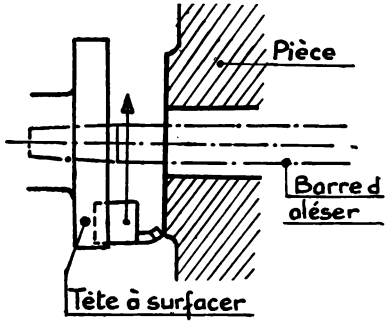


Fig. 46. — Opération de surfaçage sur machine à aléser.

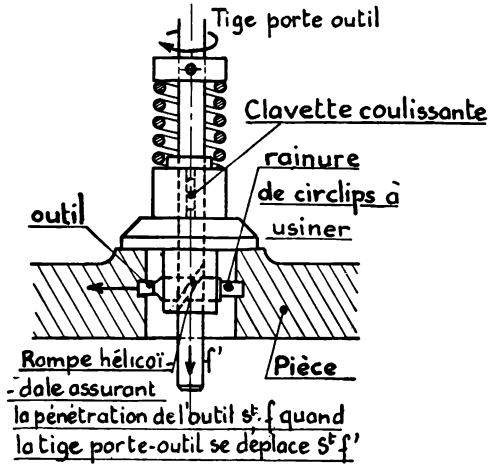


Fig. 47. — Usinage d'une rainure de circlips.

GAMME DES OPÉRATIONS D'ALÉSAGE : MONTAGE DES OUTILS SUR LES BARRES

On prévoit toujours : ébauche, demi-finition et finition. Les erreurs d'usinage avec l'outil unique proviennent principalement de la flexion de la barre d'alésage. Or, cette flexion se produit dans le plan parallèle à la résultante R des efforts de coupe : F_c, tangentiel, et F_p, pénétration (*fig.* 48 et 49).

Il est possible de monter, sur la même barre, plusieurs outils de façon à contrarier les déformations : deux outils se disposent à 180°, et trois outils à 120°.

Ainsi pourra-t-on monter sur une barre plusieurs outils : les uns pour l'ébauche, les autres pour la demi-finition.

L'outil de finition doit être monté de telle sorte qu'il n'entre en action qu'après que les outils d'ébauche ont terminé la leur. A ce moment, la flexion due aux efforts impor-

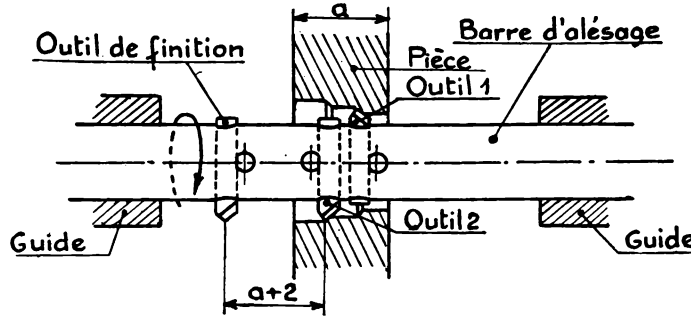


Fig. 49. — Barre à outils multiples.

tants pendant l'ébauche, a disparu. Il ne reste que la flexion, faible, causée par l'effort, réduit, développé pendant le travail de finition (*fig.* 49). Mais, sauf pour de petites séries de pièces, il est toujours préférable d'avoir deux barres : l'une pour ébauche et

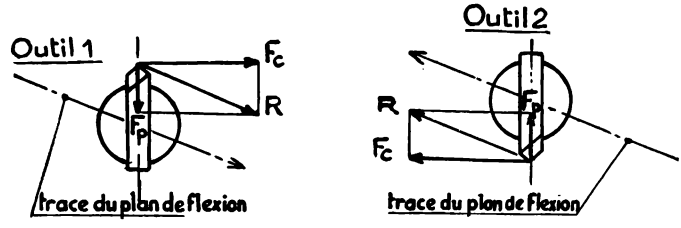


Fig. 49. — Barre à deux outils opposés : efforts de flexion.

demi-finition, et l'autre pour le parachèvement. La seconde peut d'ailleurs avoir un diamètre plus important, puisque le trou a augmenté de plusieurs millimètres pendant les opérations précédentes.

Le perçage et alésage de précision
Les machines à pointer

Les machines à pointer.

Ces machines à pointer sont surtout réservées à l'Atelier central d'outillage, bien qu'elles soient parfois utilisées pour produire des petites séries de pièces interchangeables destinées au montage de prototypes ou d'appareils constituant le début d'une grande série. On fabrique aussi, sur machine à pointer, des pièces de haute précision dans les cas où l'importance de la série ne justifie pas la création d'outillages spéciaux qu'il serait difficile d'amortir. Les premières machines à pointer ont été conçues pour distribuer des coups de pointeau sur une pièce en observant des entr'axes précis, définis, le plus souvent, en coordonnées rectangulaires :

$y_1, y_2 \ldots y_n$ sont obtenues en déplaçant la table porte-pièce,

$x_1, x_2 \ldots x_n$ sont réalisées par le déplacement de la broche porte-outil. Cette broche reçoit (en cône Morse) un pointeau semi-automatique qui frappe toujours avec la même intensité (par déclenchement d'un ressort taré). Dans ces conditions, on peut « pointer » une courbe plane quelconque (*fig.* 1).

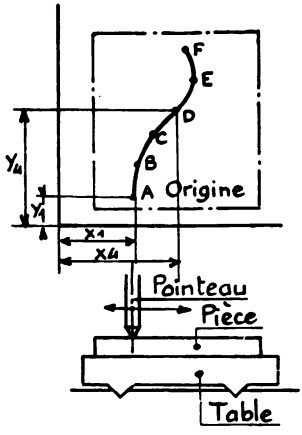


Fig. 1. — Pointage d'une courbe au pointeau automatique.

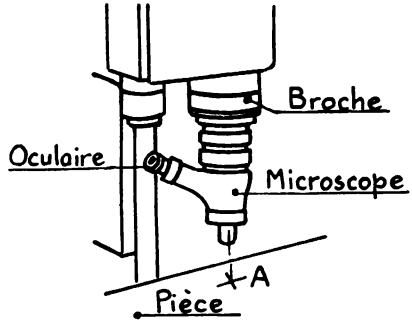


Fig. 2. — Microscope de pointage.

Si les pointés sont pris par rapport à une origine A, il faut d'abord amener celle-ci dans l'axe de la broche. Pour ce faire, on utilise un *microscope de pointage* assemblé à la broche, à travers lequel on examine le point A (*fig.* 2). En agissant sur les chariots

porte-pièce et porte-outil, on amène A au centre d'un réticule (*fig.* 3). S'il s'agit de repérer une *ligne*, il faut l'amener à passer par deux sommets opposés du petit carré central du réticule (de côté = 0,03 mm) (*fig.* 4).

On emploie aussi le microscope de pointage pour contrôler les coups de pointeau qui doivent s'insérer dans le réticule sans retoucher les réglages de la machine.

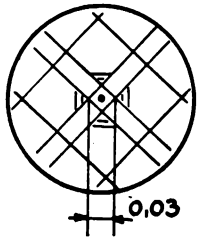


Fig. 3. — Mise en position d'un coup de pointeau dans le réticule du microscope.

Les déplacements de la table et du porte-outil peuvent être obtenus avec une précision égale à 0,005 mm.

Par la suite, ces machines devinrent des machines à percer, puis des aléseuses de précision. Elles permettent également l'exécution de travaux de fraisage légers.

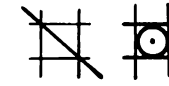


Fig. 4. — Repérage d'une ligne au microscope de pointage.

Les hautes qualités de ces machines sont dues :

- à la qualité des matériaux employés et à leur stabilisation garantissant l'indéformabilité des organes dans le temps,
- aux méthodes de fabrication et de contrôle,
- à la précision des glissières soigneusement grattées,
- aux dispositifs spéciaux qui permettent de mesurer les déplacements des chariots avec une précision de lecture de l'ordre du micron,
- à la qualité exceptionnelle des roulements de la broche, roulements qui, au bout de 40 000 heures de fonctionnement, ne montrent aucune trace d'usure appréciable.

Voici ce qu'un constructeur garantit pour trois de ses machines :

CARACTÉRISTIQUES		TYPE I	TYPE II	TYPE III
ϕ maximum de perçage	mm	3	10	35
ϕ maximum d'alésage	mm	12	22	170
Surface de table	mm	100 × 100	360 × 240	750 × 520
Lecture sur verniers	mm	0,001	0,002	0,005
Précision des déplacements	mm	0,002	0,002	0,005
Puissance (moteur de broche)	kW	0,15	0,4	4

Mesure des déplacements.

Nous ne décrirons pas ici les mécanismes employés ; bornons-nous à en donner le principe. (Voir volume sur Etude fonctionnelle des machines-outils.)

a) *Sur les premières machines*, les déplacements étaient obtenus par système vis-écrou. La vis portait un grand tambour de $d = 150$ mm, gradué en 500 parties (5 groupes de 0 à 99 ; une division = 0,01), et un vernier au 1/10 permettant,

par conséquent, d'évaluer le 1/1 000 mm. Mais il n'est pas possible de construire une vis dont le pas soit mathématiquement exact à 1 micron près. On tourne la difficulté en mesurant la vis pas par pas, minutieusement, pour établir une règle dont un bord est sinueux (*fig.* 5) : ses ordonnées traduisent les différences de pas relevées. Sur le bord sinueux de cette réglette, un galet prend appui (ressort) ; quand la table se déplace, ce galet subit de légers déplacements, reportés sur le vernier par un système simple de leviers. Le vernier oscille donc pendant que l'opérateur effectue son réglage et les erreurs se trouvent ainsi compensées. Les vis sont traitées et stabilisées.

b) *Système Hydroptic de la Société dite « La Genevoise » : S.I.P.*

Sur des machines Hydroptic, les déplacements sont lus sur des règles étalons,

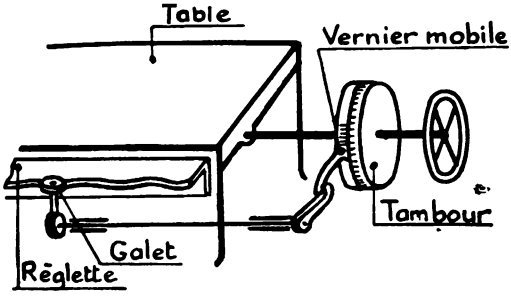


Fig. 5. — Déplacement de la table contrôlé par tambour gradué et vernier mobile.

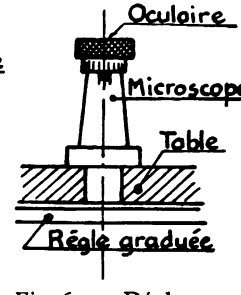


Fig. 6. — Déplacement de la table contrôlé par lecture sur une règle graduée fixe au moyen d'un microscope de pointage.

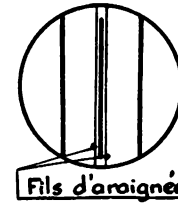


Fig. 7. — Image vue dans la lunette de visa.

à travers un microscope muni d'un réticule (*fig.* 6 et 7). Les règles sont logées sous les chariots et, par conséquent, se trouvent protégées. On lit sur des règles extérieures ordinaires les déplacements approchés, en millimètres, par rapport à un repère fixe.

Pour obtenir le réglage fin, on se sert d'un microscope dont l'oculaire est tournant. Sa rotation entraîne, vers la gauche ou vers la droite, le réticule du microscope. Le tambour de cet oculaire est gradué en 100 parties et, pour chacune d'elles, le réticule se déplace de 1/100 mm. Un vernier permet de lire le 1/10 de division et, ainsi, les déplacements des « fils d'araignée » peuvent être obtenus à 1 micron près.

Les machines actuelles possèdent trois règles : une pour la table, une pour la traverse porte-outil et une pour le chariot porte-outil.

Le principe de ce dispositif est le même que celui du lecteur optique O.P.L. (Optique de Précision de Levallois).

Exemple. — Si l'on tourne de 57 divisions alors que, préalablement, le réticule encadrait un trait de la règle (millimétrique), le réticule se déplace de 57/100 de mm. Il faut alors déplacer le chariot pour remettre le trait observé entre les « fils » du réticule. Si l'on voulait un déplacement supplémentaire de 7/1 000 de mm, on se servirait alors

du vernier. Il est évidemment préférable d'indiquer immédiatement 577 microns sur le microscope.

Le déplacement de la table porte-pièce peut être effectué au moyen d'une vis (réglage fin) ou hydrauliquement (grands déplacements et travaux de fraisage) : d'où le nom de HYDROPTIC.

c) *Sur la machine Pratt et Whitney*, le dispositif de lecture est électrique ; on lit

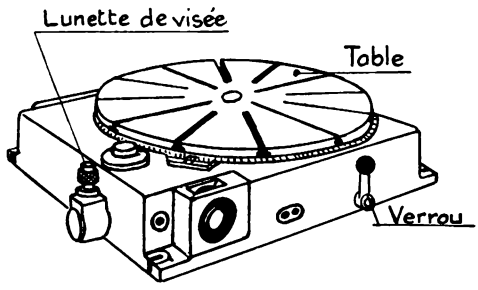


Fig. 8. — Plateau diviseur optique.

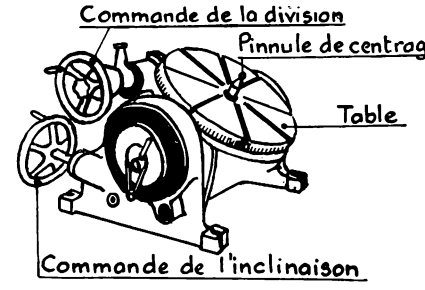


Fig. 9. — Plateau diviseur inclinable.

le réglage sur un galvanomètre de haute sensibilité. (Voir *Tome* Etude fonctionnelle des machines-outils). La précision est la même qu'avec les autres dispositifs.

Accessoires de ces machines.

a) *Plateau circulaire.*

Absolument semblable à celui des machines à fraiser, il permet le travail en coordonnées polaires : un point étant défini par un rayon et l'angle de ce rayon avec un rayon origine. Cet appareil est à lecture directe ou à lecture optique ; sa sensibilité est de l'ordre de la seconde d'arc. Le plateau est débrayable, ce qui permet des réglages rapides.

Il porte un cône Morse suivant son axe, et peut être complété par un plateau à trous et une manivelle à pointeau (*fig.* 8 et 9).

On peut placer le plateau en un point quelconque de la table, mais il faut ensuite faire coïncider l'axe du cône Morse avec celui de la brèche de la machine. Pour le plateau horizontal, on emploie le comparateur de centrage de la machine et la « pinnule cylindrique » ajustée dans le cône Morse (*fig.* 10). Le réglage est effectué quand l'aiguille du comparateur, qui a été réglé lui-même d'après le diamètre de la pinnule, reste immobile.

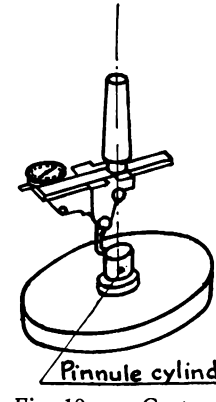


Fig. 10. — Centrage d'un plateau circulaire à l'aide de la pinnule cylindrique.

On utilise aussi des plateaux inclinables pour le perçage et l'alésage des trous obliques (*fig.* 9). Leur centrage est plus délicat et nécessite l'emploi d'une « pinnule à sphère », dont la cote est rigoureusement connue et un niveau de pinnule (*fig.* 11). On déplace table et porte-broche jusqu'à ce que la bulle du niveau d'eau indique le zéro.

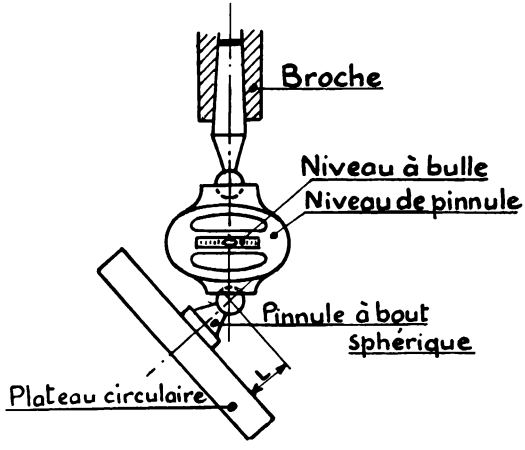


Fig. 11. — Mise en position du plateau circulaire incliné à l'aide du niveau à pinnule.

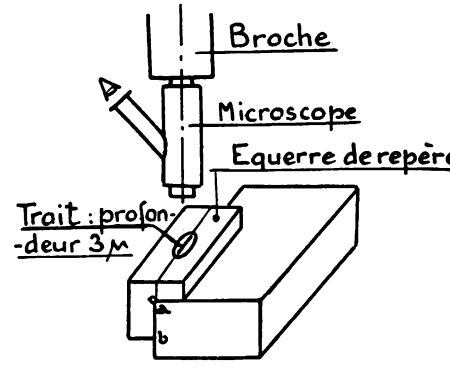


Fig. 12. — Lecture à l'équerre de repère avec microscope de pointage monté sur la broche.

Équerre de repère.

C'est une pièce en acier inoxydable (*fig.* 12) portant un trait T sur une de ses faces extérieures. Ce trait est contenu dans le plan *ab* qui sert à l'appuyer contre la pièce à usiner. Quand le trait T est encadré dans le microscope de réglage on est certain que l'axe de la broche est dans le plan de la face d'appui qui ainsi devient « surface de référence » pour toutes les prises de cotes ultérieures.

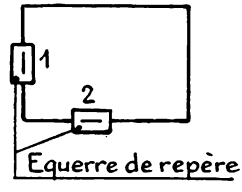


Fig. 13. — Repérage de deux faces octogonales avec l'équerre repère.

On peut donc rapporter tout l'usinage à deux faces orthogonales précises si on fait deux visées en 1 et en 2 (*fig.* 13).

Bras de guidage.

Il se monte sur le chariot porte-broche et reçoit des douilles traitées (*fig.* 14) ou canons de

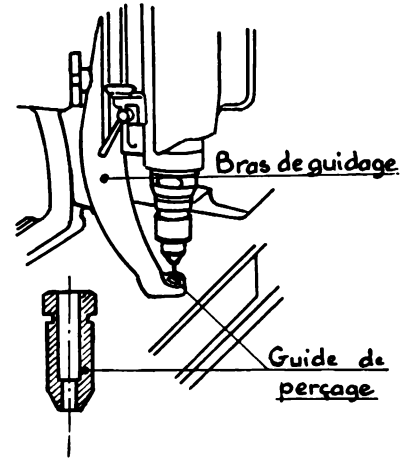


Fig. 14. — Utilisation du bras guide pour le perçage et l'alésage.

perçage dont le diamètre intérieur correspond exactement au diamètre des forets et des alésoirs employés. Les outils sont ainsi parfaitement centrés et ne sont pas sujets au flambage dans les plus petites dimensions.

Porte-outil à planer, tourner et rainurer (fig. 15 et 16).

Le déplacement du chariot porte-outil de cet appareil est donné par la rotation de la broche et un train épicycloïdal quand, à la main ou au moyen d'un collier, on immobilise la couronne moletée. Cette couronne se déplace devant un tambour gradué : chaque division correspond à une variation de 0,2 mm sur le diamètre. Dès qu'on lâche la couronne, l'outil stoppe et l'on peut ainsi s'arrêter sur une division préalablement déterminée.

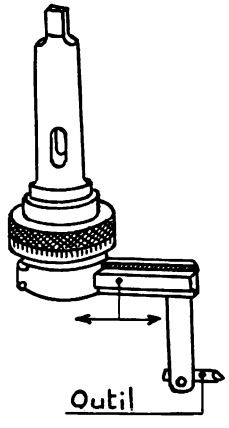


Fig. 15. — Outil à planer

Installation de la machine.

La machine à pointer doit être soigneusement nivelée, placée sur d'excellentes fondations et loin de toute machine mal équilibrée ou travaillant par chocs. On lui consacre un local spécial, isotherme ou climatisé à 20° C et on la confie toujours au même ouvrier hautement qualifié. Bien conduite et bien entretenue elle conservera longtemps une précision quasi mathématique. Les plus petites machines coûtent environ 30 000 F et les plus importantes atteignent 200 000 F.

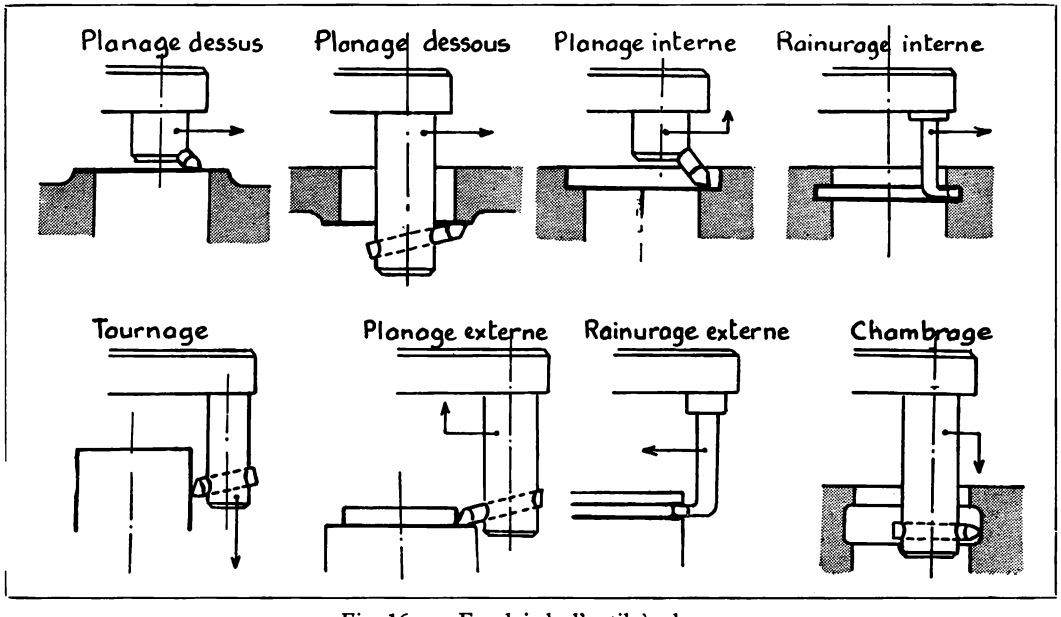


Fig. 16. — Emploi de l'outil à planer.

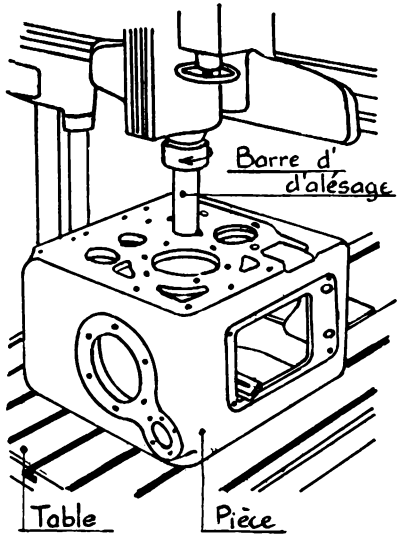


Fig. 17. — Usinage d'un carter de boîtes de vitesses pour un prototype : pièce montée sur la table de la machine.

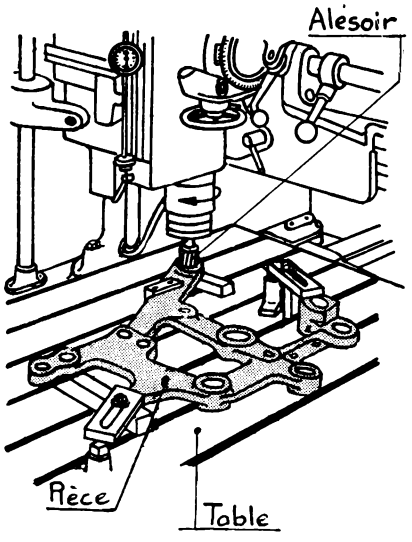


Fig. 18. — Finition de trous à l'aide de fraises et alésoirs. Pièce montée sur la table de la machine.

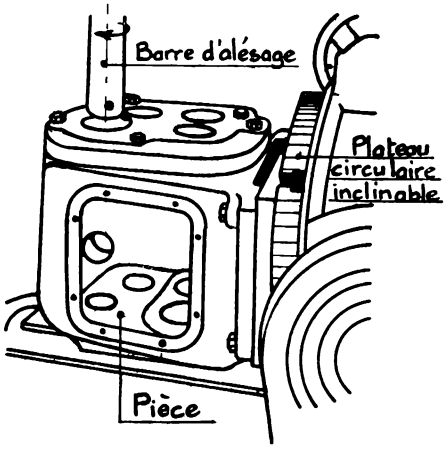


Fig. 19. — Montage sur plateau circulaire inclinable : alésage de trous sur les cinq faces d'une boîte de vitesses sans démonter la pièce.

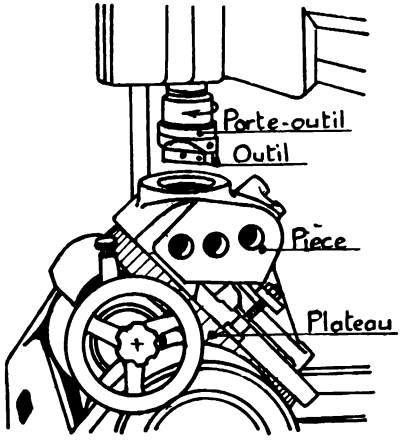


Fig. 20. — Usinage d'un alésage oblique de grand diamètre sur plateau circulaire inclinable.

Possibilités.

Construction d'outils de presse à poinçons multiples : un constructeur cite dans son catalogue la belle réalisation d'un outillage comportant 2 565 trous exactement situés sur le porte-poinçon, le dévêtisseur et le porte-matrices d'un appareillage permettant d'obtenir, en un seul coup de presse, 855 trous dans une tôle de 915 × 345 × 3,5 mm. Tolérance sur les entraxes : 0,005.

Porte-pièces pour machines à transfert (cas de la Régie nationale Renault). Certains outillages exigent la construction de 50 porte-pièces pratiquement identiques, en service simultané sur la machine. Seules, les machines à pointer permettent leur usinage avec la précision serrée qui garantit l'interchangeabilité parfaite des pièces réalisées, automatiquement d'ailleurs, sur ces outillages.

Enfin, on peut, avec ces machines, usiner sans difficulté les trous radiaux, les trous obliques, convergents ou non, ainsi que des alésages rigoureusement perpendiculaires.

Les *figures* 17 et 18 montrent quelques cas d'emploi de ces machines.

Exécution des surfaces de révolution extérieures et intérieures

LE TOURNAGE

Surfaces réalisées.

On obtient par tournage toutes les surfaces de révolution et, plus couramment, les surfaces de révolution à génératrice rectiligne :

cylindres extérieurs et intérieurs,
cônes extérieurs et intérieurs.

L'usinage des surfaces de révolution à génératrice courbe est beaucoup moins fréquent.

La pièce étant animée du mouvement de coupe, qui est une rotation, il est normal que le mouvement d'avance de l'outil soit une translation, ou la combinaison de deux mouvements de translation orthogonaux.

Travail à l'outil d'enveloppe.

L'outil d'enveloppe est le plus souvent employé. Lorsque cet outil est animé d'une translation parallèle à l'axe de la pièce, sa partie active trace sur la pièce des sillons hélicoïdaux. Si ces sillons sont peu profonds, la surface obtenue peut être assimilée à un cylindre (voir *fig.* 1 et *fig.* 2).

L'outil peut recevoir deux mouvements d'avance orthogonaux : l'un parallèle à l'axe de rotation : M_a, et l'autre perpendiculaire à l'axe : M_p (mouvement de pénétration).

La trajectoire de l'outil, résultant de M_a et de M_p, est contenue dans le plan défini par l'axe de rotation et la trajectoire donnée par M_a.

Si V_a et V_p désignent les vitesses de ces déplacements, on obtient :

a) Un cône lorsque $\frac{Vp}{Va} = tg\alpha = \text{Constante}$, *figure* 3,

b) Une surface de révolution à génératrice courbe lorsque $\frac{Vp}{Va} = K$ variable ; *figure* 4,

c) Un plan normal à l'axe lorsque seul subsiste le mouvement normal à l'axe de rotation, *figure* 5.

On peut également obtenir un cône, en communiquant à l'outil un mouvement d'avance dirigé suivant la génératrice, *figure* 6.

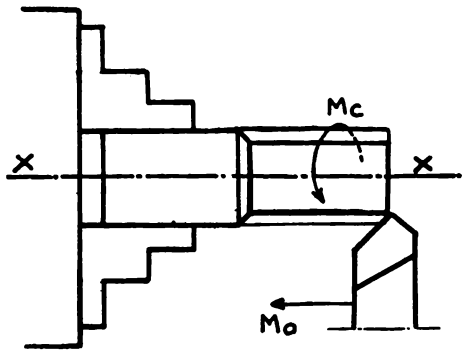


Fig. 1. — Tournage extérieur. Chariotage.

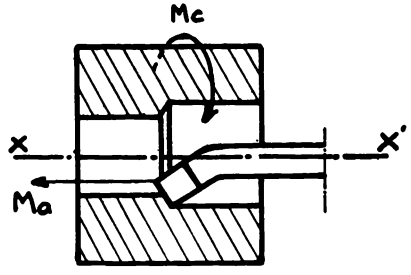


Fig. 2. — Tournage intérieur. Alésage.

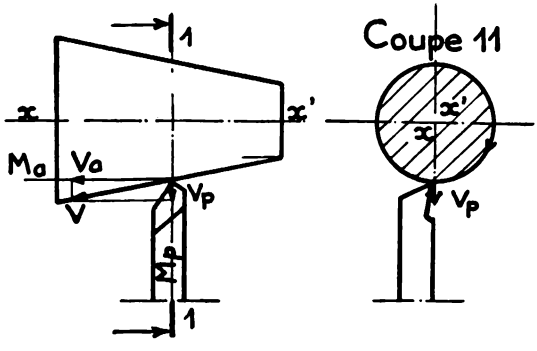


Fig. 3. — Réalisation d'une surface conique.

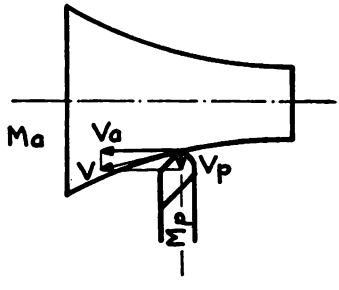


Fig. 4. — Réalisation d'une surface de révolution à génératrice courbe.

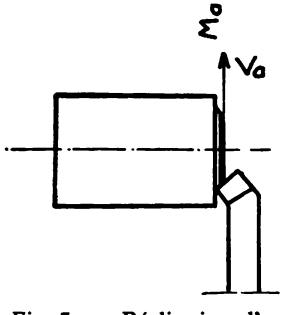


Fig. 5. — Réalisation d'un plan.

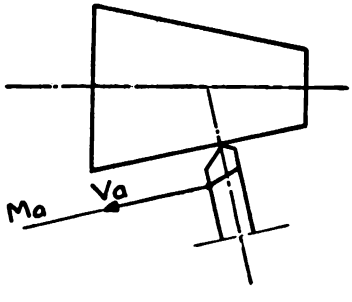


Fig. 6. — Réalisation d'un cône par déplacement oblique de l'outil.

Travail à l'outil de forme.

La forme de l'arête tranchante de l'outil correspond à celle de la génératrice de la surface de révolution. La pénétration de l'outil peut se faire suivant :

— une direction normale à l'axe de rotation xx' (*fig.* 7),

— une direction parallèle à l'axe xx' (*fig.* 8),

— une direction oblique (*fig.* 9).

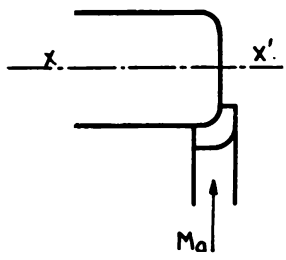


Fig. 7. — Réalisation d'une surface torique : pénétration de l'outil de forme normal à l'axe.

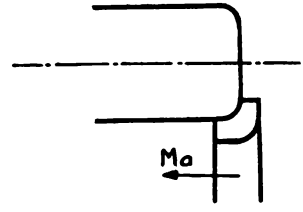


Fig. 8. — Réalisation d'une surface torique : pénétration de l'outil parallèle à l'axe.

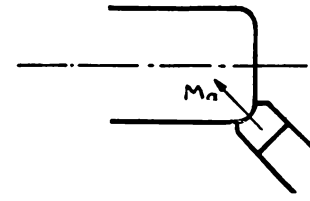
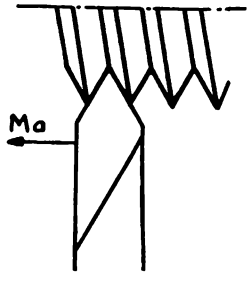


Fig. 9. — Réalisation d'une surface torique : pénétration de l'outil oblique.

En donnant à l'outil un mouvement d'avance M_a, parallèle à l'axe de rotation, et dont la vitesse est proportionnelle à la vitesse de rotation, on obtient une surface hélicoïdale (filetages) (*fig.* 10).



Les outils de forme sont chers, leur affûtage est coûteux ; les arrondis peuvent souvent être remplacés par des chanfreins, réalisables avec l'outil à charioter. En règle générale, le tracé des pièces doit exiger le moins possible le recours aux outils de forme pour l'usinage.

◀— *Fig.* 10. — Réalisation d'une surface hélicoïdale.

L'OUTIL DE TOURNAGE

Les formes et les conditions d'emploi des différents outils de tour ont été étudiées en technologie de spécialité (1). Le mode d'action des outils de coupe ayant été développé dans les tomes précédents, nous limiterons notre étude à celle des compléments indispensables pour comprendre l'évolution de la technique du tournage.

(1) Technologie pour le tourneur, de GOUPIL. Foucher, Éditeur.

Constitution des outils.

Les outils dont la partie active est en carbure métallique tendent à se substituer de plus en plus aux outils à coupe rapide, car ils produisent trois à quatre fois plus. Les carbures pour outils comportent plusieurs nuances et sont utilisés, soit sous forme de plaquettes brasées au cuivre sur des corps en acier demi-dur soit sous forme de blocs prismatiques. Les carbures travaillant mieux à la compression qu'à la flexion, il est préférable de placer l'outil rapporté tangentiellement par rapport à la pièce, sur un porte-outil spécialement conçu (*fig.* 11). L'affûtage de ces outils fait apparaître, le plus souvent, un vé déflecteur qui facilite l'enroulement du copeau. La *figure* 12 représente un outil à plaquette rapportée, à pente d'affûtage positive, avec rainure d'enroulement du copeau. On remarquera que la plaquette brasée déborde de 0,5 à 1 mm du corps de l'outil, pour éviter que la meule d'affûtage diamantée s'encrasse au contact de l'acier.

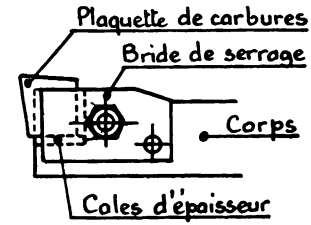


Fig. 11. — Outil à plaquette de carbure rapportée.

La *figure* 13 (*a* et *b*) représente un outil à pente négative et à rainure d'enroulement oblique qui favorise l'évacuation des copeaux latéralement par rapport au tour.

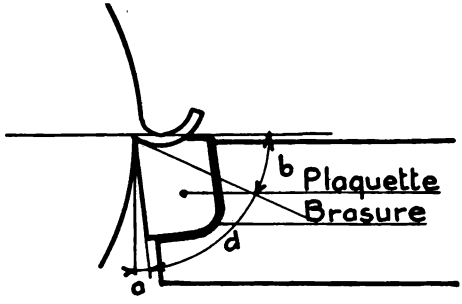
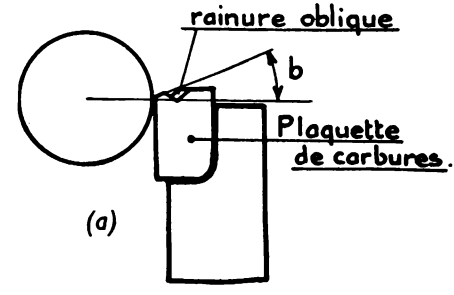


Fig. 12. — Outil à pastille de carbure brasée et à pente d'affûtage positive.



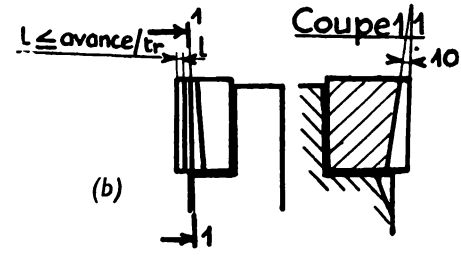


Fig. 13 *a.* — Outil à pastille de carbure brasée et à pente d'affûtage négative.
13 *b.* — Vue de dessus et coupe de l'outil.

Cet affûtage favorise l'enroulement correct des copeaux pour toutes les profondeurs de passe. L'affûtage à pente négative protège surtout l'arête tranchante. L'emploi des outils à pente d'affûtage négative est très discuté en raison de l'augmentation des efforts de coupe qu'il engendre. Il est réservé aux outils qui doivent avoir une usure minimum (outils de finition), qui travaillent des matières très dures, ou abrasives (aciers réfractaires, pièces fortement « calaminées ») ou encore quand l'arête tranchante se refroidit mal : outils à saigner.

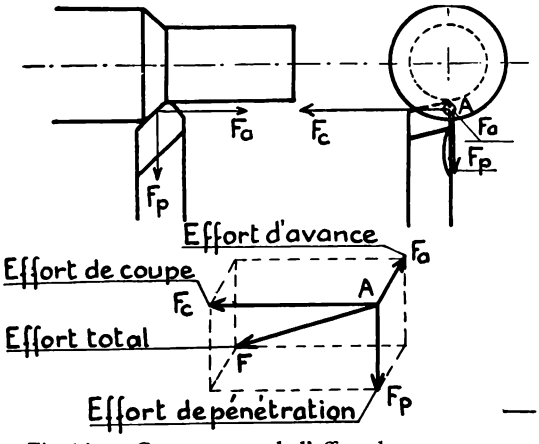


Fig. 14. — Composantes de l'effort de coupe dans le cas du chariotage.

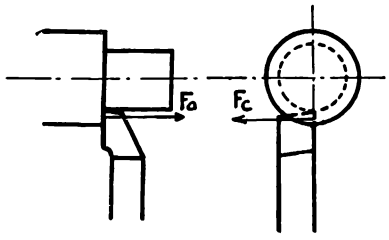


Fig. 15. — Composantes de l'effort de coupe dans le cas du travail à l'outil couteau.

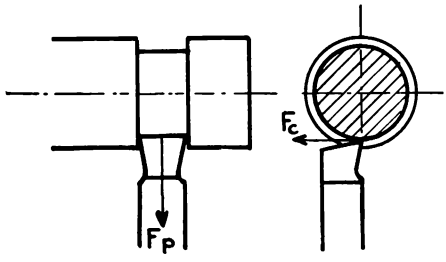


Fig. 16. — Composantes de l'effort de coupe dans le cas du tronçonnage.

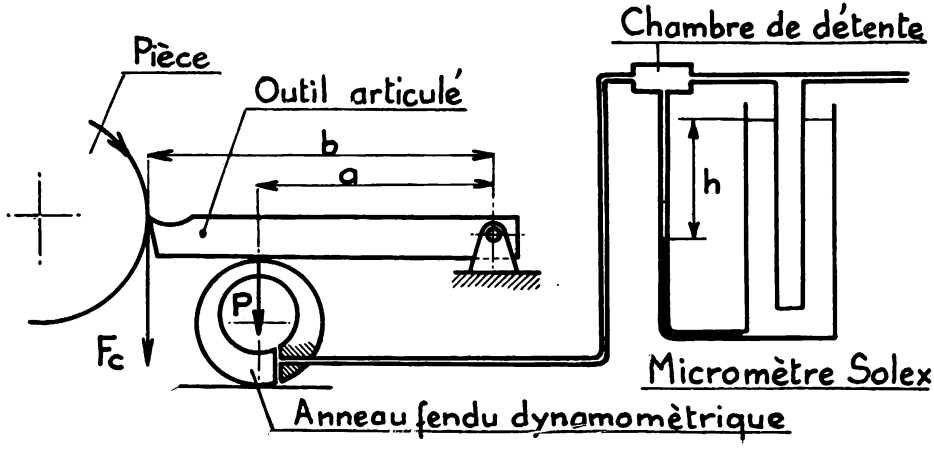


Fig. 17. — Mesure de la composante Fc de l'effort de coupe.

Durée des outils en carbures.

Cette durée est affectée par un mauvais choix de la vitesse de coupe. L'usure est rapide aux basses vitesses de coupe et aux vitesses excessives. Il y a lieu de respecter les données du fournisseur, ou d'utiliser les abaques dûs à M. Combes (voir *tome classe de seconde*).

La valeur de l'avance par tour a peu d'influence sur la durée de l'outil. Elle peut donc varier dans de grandes proportions, et son choix est surtout conditionné par l'état de surface à obtenir.

Influence de la lubrification.

Différents essais ont montré que la longévité d'un outil en carbures augmente de 20 à 40 % quand il est correctement arrosé. La lubrification doit être abondante, afin de provoquer l'élimination de la plus grande quantité de la chaleur produite ; le contact avec la pièce est meilleur à faible pression grâce à l'action d'une huile de coupe. Notons cependant les essais, effectués récemment, d'arrosage en dessous de l'outil, sous une pression élevée (procédé Hi-Jet). L'arrosage ne doit pas s'opérer sur le copeau, comme on le fait trop souvent pour les aciers à coupe rapide, mais entre la plaquette et le copeau : ainsi on refroidit la partie active de l'outil, tout en laissant au copeau le maximum de plasticité due à l'élévation de sa température.

Les efforts de coupe dans les travaux de tournage.

L'action F de la pièce sur un outil de tour admet, selon la forme de l'outil, deux ou trois composantes.

Outil à charioter : trois composantes (*fig.* 14) :

F_c effort de coupe,
F_a effort d'avance,
F_p effort de pénétration.

Outil couteau : deux composantes (*fig.* 15) :

F_c effort de coupe,
F_a effort d'avance,
F_p est ici sensiblement nul.

Outil pelle ou à saigner (*fig.* 16) deux composantes :

F_c effort de coupe,
F_p effort de pénétration,
F_a est ici nul.

La mesure de ces différents efforts nécessite l'emploi d'un support d'outil dynamométrique. A titre d'exemple, nous avons représenté le schéma de principe d'un dispositif permettant de mesurer l'effort de coupe F_c (*fig.* 17).

Le dynamomètre Mécalix-Moulin est constitué par un anneau fendu, dont on peut mesurer les petites déformations au moyen d'un micromètre Solex étalonné à cet effet et gradué en Newtons. L'outil, articulé à une extrémité, exerce sur l'anneau un effort P proportionnel à F_c :

$$P = F_c \cdot \frac{b}{a}$$

Les différents essais ont montré que l'effort de coupe est beaucoup plus important que F_a et F_p.

Il peut s'exprimer par la relation : $F_c = K.S.$

dans laquelle F_c est l'effort de coupe en Newton,

S la section du copeau en millimètres carrés,

et K un coefficient, appelé résistance spécifique à la coupe, et qui s'exprime en Newton par millimètre carré ou en kgf/mm².

La valeur de K varie avec la nature du métal travaillé, la forme de l'outil et la qualité de l'affûtage de celui-ci.

On peut admettre, comme première approximation, que $K = 3$ à $4\ (R_r)_e$ pour les aciers, et $K = 4$ à $5\ (R_r)_e$ pour les fontes.

Les différents essais ont donné les résultats moyens suivants :

Fonte douce	K = 500 à 750 N/mm²
Fonte dure	K = 1 150 à 1 400 N/mm²
Acier laminé $(R_r)_e = 400$ N/mm²	K = 1 500 à 1 600 N/mm²
Acier laminé $(R_r)_e = 800$ N/mm²	K = 2 200 à 2 500 N/mm²
Acier coulé	K = 1 200 à 1 600 N/mm²
Bronze	K = 500 à 1 000 N/mm²

L'effort de coupe varie peu avec le type d'outil utilisé (à charioter, à couteau, à saigner), les conditions d'utilisation étant les mêmes dans chaque cas. Les valeurs de F_a et de F_p se déduisent de F_c. Les essais ont donné les résultats moyens suivants :

TYPE D'OUTIL	MÉTAL TRAVAILLÉ	F_a	F_p
Outil à charioter angle de direction = 45°	Fonte	1/3 F_c	1/3 F_c
	Aciers	2/5 F_c	2/5 F_c
Outil à charioter angle de direction = 30°	Fonte	1/4 F_c	1/3 F_c
	Aciers	1/3 F_c	1/2 F_c
Outil couteau	Fonte Aciers	2/3 F_c	1/10 F_c
Outil pelle	Fonte Aciers	1/10 F_c	2/3 F_c

Ces efforts de coupe doivent être équilibrés par le support d'outil, dont ils conditionnent le mode d'ablocage et la conception.

L'étude de la formation du copeau montre que les efforts sont variables dans le temps. Il en résulte une flexion périodique de l'outil, source de vibrations de la machine et de défauts microgéométriques de la surface.

Action de l'outil sur la pièce.

Le principe de l'équilibre des actions de contact nous permet d'écrire que les actions de l'outil sur la pièce sont égales et directement opposées à F_c, F_a et F_p.

Sous l'action de F'_c et de F'_p la pièce, supposée supportée en M et N, fléchit. Comme celle de l'outil, cette flexion est périodique (*fig.* 18).

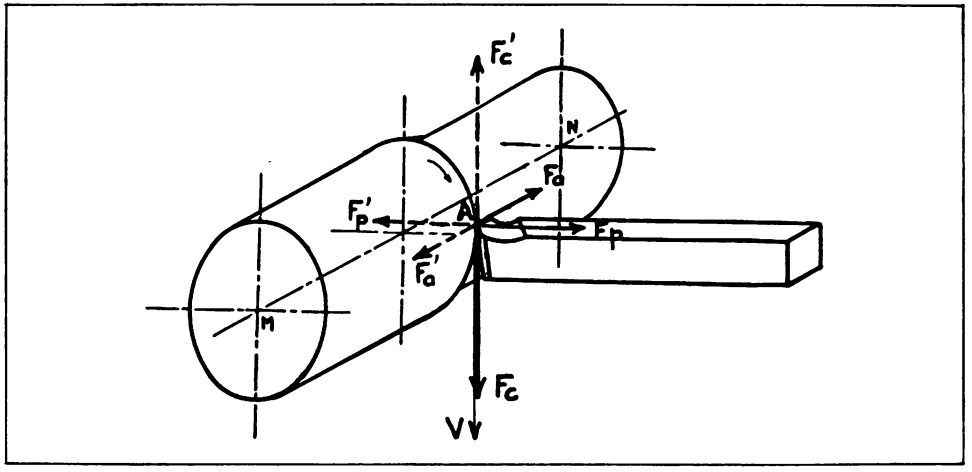


Fig. 18. — Composantes des actions mutuelles outil-pièce.

Puissance nécessaire à la coupe.

Au cours du travail, le point d'application de la force F'_c qui s'exerce sur la pièce, se déplace suivant la direction de la force, et en sens inverse de celle-ci, à la vitesse de coupe V_c m/s.

La puissance résistante qui en résulte a pour expression :

$$P \text{ en } W = F \times V \qquad \text{avec} \qquad F \text{ en N} \qquad \text{et} \qquad V \text{ en m/s.}$$

La puissance due à F'_a est motrice et a pour expression, en employant les mêmes unités :

$$P_1 = F'_a \cdot V_a$$

V_a, représentant la vitesse de déplacement de F'_a sur sa direction, est la vitesse d'avance ; elle est très faible, et P_1 est donc négligeable.

La puissance prise par F_p est nulle, puisqu'il n'y a pas de déplacement du point d'application sur la direction de la force.

La puissance nécessaire à la production du copeau, ou puissance de coupe, P_c watts a donc pour expression :

$$P \text{ en } W = F_c \cdot V = KSV$$

ou :

$$P_c \text{ en KW} = \frac{K \,.\, S \,.\, V}{10^3}.$$

Dans ces formules exprimer K en N/mm² et S en mm. V en m/s.

La section du copeau est donc limitée par la puissance disponible sur la broche :

$$S = \frac{P \text{ en W}}{KV}$$

La puissance du moteur de la machine est fonction :

a) du rendement de tous les organes transmettant l'énergie du moteur électrique à la pièce : courroie, engrenages de la boîte de vitesses, paliers, supports d'arbre et de broche ;

b) de la puissance nécessaire aux mouvements de coupe et d'avance.

Généralement le rapport : $\frac{\text{Puissance de coupe}}{\text{Puissance du moteur}} = 0{,}6 \text{ à } 0{,}8$

On a donc :

$$P_m = \frac{P_c}{0{,}6 \text{ ou } 0{,}8}$$

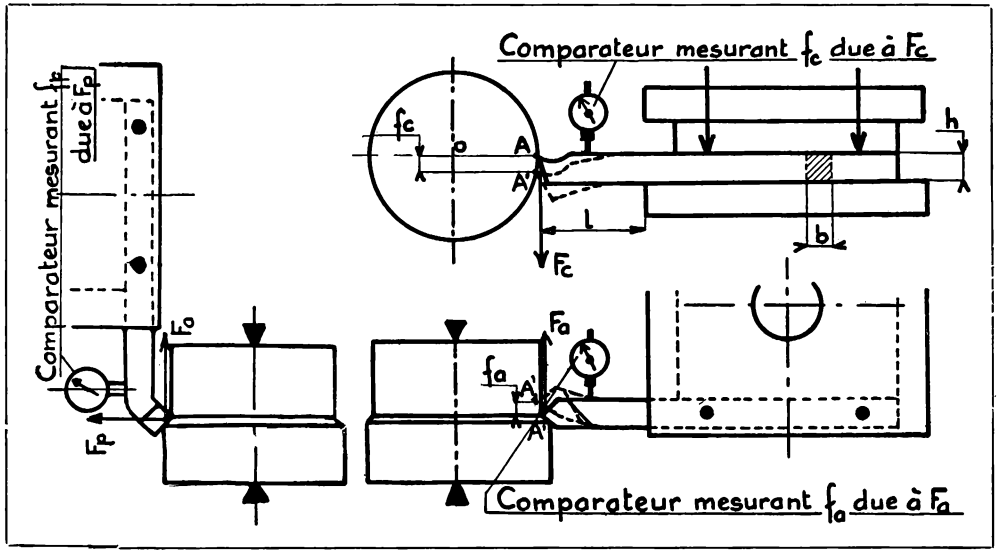


Fig. 19. — Mise en évidence des composantes de l'effort de coupe par mesure des déformations de l'outil.

Flexion des outils.

L'outil de tour est nécessairement monté en porte à faux (*fig.* 19). Soumis aux efforts de coupe, il fléchit. Comme pour tous les outils de tour, cette flexion est variable pendant l'action de l'outil (mouvement vibratoire). Voir *Théorie de la formation du copeau, classe de seconde.*

Trois comparateurs, mis en contact avec l'outil, révèlent que les flèches f_c, f_a, f_p :

a) augmentent avec la section du copeau donc avec les composantes F_c, F_a et F_p de l'effort de coupe,

b) augmentent quand la section de l'outil diminue,

c) augmentent rapidement avec la longueur du porte à faux l.

En particulier, F_c et l restant constants, f_c double si b diminue de moitié, et s'accroît beaucoup plus encore si h diminue de moitié (théoriquement $2^3 = 8$ fois plus grande).

Les aiguilles des comparateurs, sans cesse en mouvement, mettent en évidence la variation périodique des flèches.

Ces résultats expérimentaux, qui ne peuvent être que qualitatifs, sont conformes à la théorie des déformations élastiques des pièces fléchies.

On démontre en effet en mécanique que la flèche f_c a pour expression :

$$f_c = k \cdot \frac{F_c l^3}{EI}$$

E module d'élasticité est égal, pour les aciers, à 2×10^5 N/mm².

I, moment d'inertie de la section a pour expression :

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

h étant la dimension parallèle à l'effort qui provoque la flexion (si on étudiait la flèche f_a on aurait $I = \frac{hb^3}{12}$)

On a donc :

$$f_c = k \cdot \frac{F_c \cdot l^3}{E \cdot \frac{bh^3}{12}} = 12\,k\,\frac{F_c l^3}{Ebh^3}$$

Conclusions pratiques.

Puisque la flèche f_c est variable, la distance OA n'est plus constante (voir *fig.* 19). La surface de la pièce n'est plus un cylindre parfait : les défauts microgéométriques apparaissent. Lorsque les déformations sont amplifiées par suite de la flexion des supports d'outil et de pièce, leurs vibrations combinées donnent jour à un phénomène de résonance, et les défauts apparaissent à l'œil nu : on dit alors qu'il y a broutement. Pour améliorer l'état de surface de la pièce, il faut, de toute évidence, limiter la flèche prise par l'outil et, pour cela :

— diminuer la longueur de porte à faux l. On prend généralement $l < 2\,h$;

— augmenter le moment d'inertie de l'outil, en choisissant un outil de section maximum et dont la dimension h, parallèle à la plus grande composante F_c de l'effort de coupe, sera aussi importante que possible ;

— rendre le support d'outil aussi rigide que possible, par le réglage correct des jeux des chariots.

D'autre part, l'effort de coupe doit plaquer le traînard sur le banc du tour, pour assurer à l'outil une trajectoire parallèle à l'axe de rotation, par le contact constant des surfaces de guidage, généralement en V.

Le travail à l'envers, rendu autrefois indispensable sur les tours à broche montée sur coussinets dont on ne pouvait pas toujours annuler le jeu, doit être proscrit pour les travaux d'alésage au tour.

Si l'on place deux porte-outils sur le chariot transversal du tour (*fig.* 20), on confiera à l'outil arrière le taillage du copeau de plus faible section, pour lequel :

$$F'_c < F_c$$

Car F'_c tend à soulever les chariots.

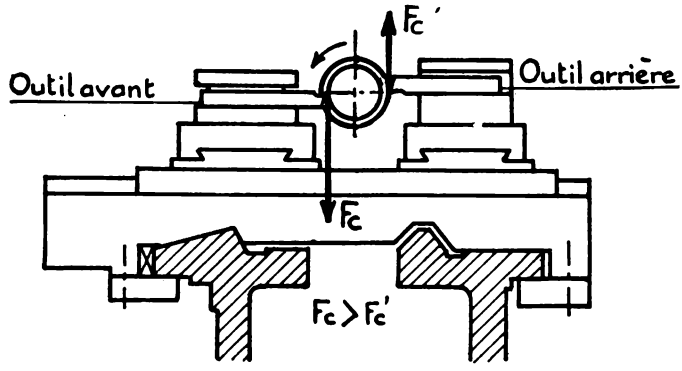


Fig. 20. — Composante de F. dans le cas du tournage avec 2 porte-outils.

Limitation par usure de l'outil.

Quand l'outil fléchit, la trajectoire d'un point de son arête tranchante peut être assimilée à un arc de cercle dont le centre I est appelé centre instantané de rotation. Si ce centre est au-dessus de OA, la trajectoire ne pénètre pas dans la pièce : elle est dégageante. S'il est au-dessous de OA, la trajectoire est située à l'intérieur de la pièce,

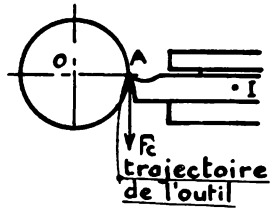


Fig. 21. — Trajectoire engageante de l'outil.

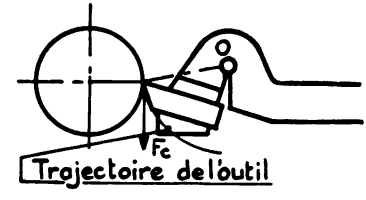


Fig. 22. — Trajectoire dégageante de l'outil.

elle est dite engageante. Dans ce second cas, le frottement de la pièce sur l'outil augmente et l'usure de l'outil est rapide (*fig.* 21). Si l'outil et son support sont rigides, le déplacement de l'outil est très réduit, et l'usure en résultant est insignifiante.

Lorsqu'on doit utiliser un outil flexible, il est recommandé de lui donner une forme qui lui assure une trajectoire dégageante (*fig.* 22).

On est quelquefois conduit à monter sur un outil rigide un barreau traité, de faible section, donc assez flexible. C'est le cas de certains outils de tours automatiques. Dans ce cas, en faisant travailler l'outil tangentiellement à la pièce, on impose à l'outil une trajectoire dégageante si le porte-outil est considéré comme infiniment rigide (*fig.* 23).

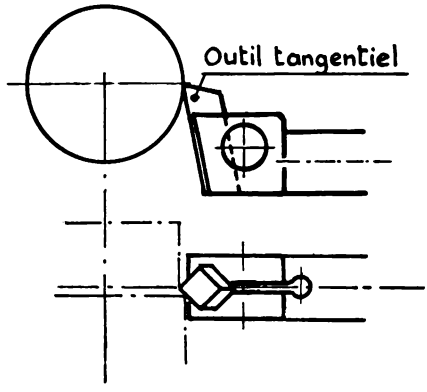


Fig. 23. — Outil de tour automatique travaillant tangentiellement. ⟶

POSITION DE L'OUTIL ET CHOIX DE LA SECTION DU COPEAU EN FONCTION DES DIMENSIONS DE L'OUTIL

Le porte-à-faux d'un outil ne devrait jamais dépasser deux fois sa hauteur :

$$l < 2\,h \text{ (}\textit{fig.}\text{ 24).}$$

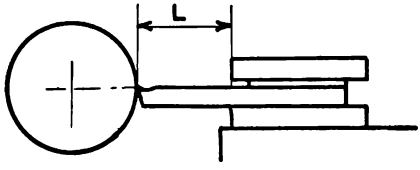


Fig. 24. — Porte-à-faux d'un outil.

Dans ces conditions, pour un outil de dimensions maxima admises par la tourelle support d'outil, les sections de copeaux limites, pour un travail correct, sont données par le tableau ci-dessous :

Section du copeau en mm².	1	1,6	2,5	4	6	10	16	25
Section de l'outil carré....	10 × 10	12,5×12,5	16 × 16	20 × 20	25 × 25	32 × 32	40 × 40	50 × 50
Section de l'outil rectangle		8 × 10	10 × 12	12 × 22	16 × 28	20 × 36	25 × 45	36 × 56

Flexion des pièces : étude expérimentale.

Première série d'expériences sur pièces montées entre pointes.

On monte entre pointes une pièce longue et de faible diamètre (*fig.* 25). Un outil à charioter effectue une passe sur toute la longueur de la pièce. Un comparateur contrôle les déformations prises par la pièce.

Constatations.

L'aiguille du comparateur enregistre des déformations constamment variables : la flexion de la pièce, comme celle de l'outil, est « ondulée ».

Lorsque l'outil travaille près des appuis, en C_1 et C_2 la flèche enregistrée est très faible.

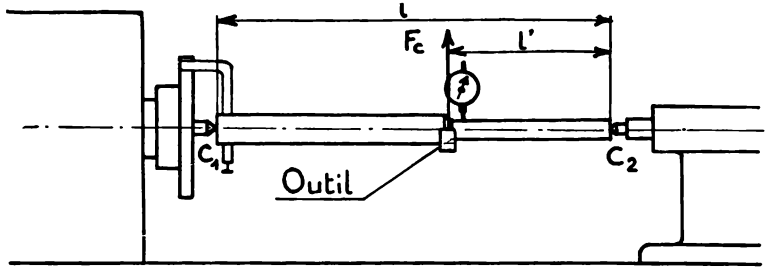


Fig. 25. — Mesure de la flèche prise par une pièce en cours d'usinage.

Quand l'outil est en B, au milieu de la pièce, la flèche prise par la pièce atteint sa valeur maximum.

La passe étant terminée, si on mesure les différents diamètres de la pièce, on trouve, par exemple :

$$\phi_{C_1} = \phi_{C_2} = 20$$
$$\phi_B = 20{,}3$$

La pièce obtenue n'est pas cylindrique, elle a légèrement la forme d'un tonneau (*fig.* 26).

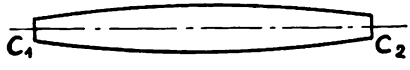


Fig. 26. — Forme d'une pièce longue mal soutenue au cours de l'usinage.

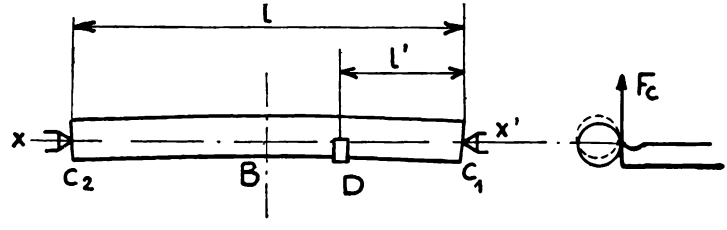


Fig. 27. — Mode d'action d'un outil usinant sur une pièce flexible.

Essayons d'expliquer cette constatation :

Supposons l'outil en un point quelconque D de la pièce, et imaginons un outil dont la rigidité est telle que tous les points de son arête tranchante décrivent une droite parallèle à l'axe de rotation XOX' (*fig.* 27).

Si la pièce ne se déformait pas, la section obtenue serait la circonférence dont le centre O est confondu avec la projection de l'axe de rotation (*fig.* 28).

Mais, sous l'action des efforts Fc et F_p, la pièce fléchit, et le centre O′ de la pièce n'est plus confondu avec l'axe de rotation O. Le rayon de la pièce est alors O′A > OA. On voit facilement que OO′, flèche prise par la pièce, est d'autant plus grande que la position de l'outil se rapproche davantage du milieu B, équidistant des appuis C_1 et C_2 (*fig.* 26).

En C_1 et en C_2, la flèche est nulle, et O et O′ sont confondus ; le diamètre de la pièce est : $\phi_{C_1} = \phi_{C_2} = \overline{2AO}$

En D, on a $\phi_D = 2\,AO' > 2\,AO$

et en B, puisque OO′ est maximum, ϕ_B est maximum.

L'expérience, renouvelée avec des pièces de longueurs différentes mais de même

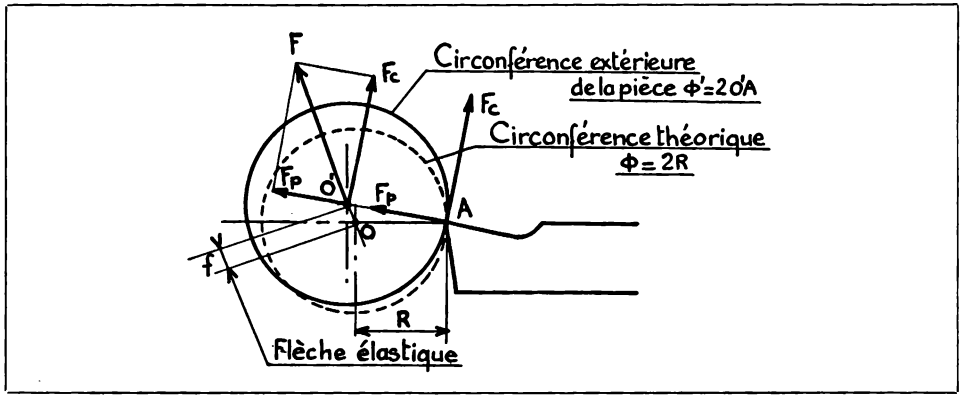


Fig. 28. — Erreur d'usinage résultant de la flexion d'une pièce tournée.

diamètre, puis avec des pièces de même longueur mais de diamètres différents, conduit aux conclusions suivantes :

- les flèches prises par les pièces de même diamètre augmentent très rapidement avec la longueur de la pièce (théoriquement $f = kl^3$) ;
- les flèches prises par des barres de même longueur augmentent beaucoup quand le diamètre diminue.

Théoriquement, les flèches sont inversement proportionnelles à la quatrième puissance du diamètre de la pièce (moment d'inertie) : $f = \dfrac{K}{d^4}$.

Si on renouvelle les expériences précédentes en utilisant des pièces constituées par différents métaux, on établit que, pour de mêmes dimensions des pièces :

- les flèches maxima décroissent quand les métaux sont usinés, dans l'ordre suivant : alliages de magnésium, alliages d'aluminium, laitons, bronzes et enfin aciers (théoriquement, $f = \dfrac{K}{EI}$, E : module d'élasticité longitudinal).

● L'expérience montre que les flèches varient proportionnellement à la section du copeau, c'est-à-dire à l'effort de coupe.

Expériences sur pièces montées en l'air.

Ces expériences conduisent à des conclusions semblables aux précédentes. Mais la pièce usinée a une forme sensiblement tronconique, le plus petit diamètre d_1 étant situé près du mandrin de serrage (*fig.* 29). On constate, d'autre part, que, pour des pièces de mêmes dimensions (l et d), et une même section de copeau, la flèche maximum est beaucoup plus grande dans le montage en l'air que dans le montage entre pointes.

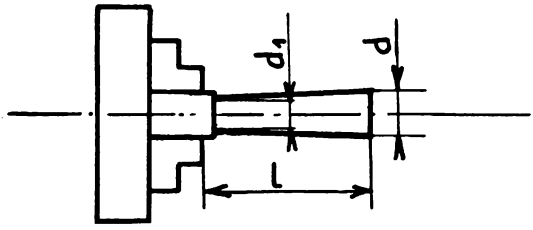


Fig. 29. — Forme d'une pièce tournée en porte-à-faux.

Remarques.

1° Les résultats expérimentaux sont conformes à la théorie des déformations élastiques des pièces fléchies.

La valeur de la flèche maximum d'une pièce supportée sur deux appuis (entre pointes), ou d'une pièce encastrée à une extrémité (montage en l'air), est donnée par une relation de la forme : $f = K \dfrac{FL^3}{EI}$ mm dans laquelle ,

F est l'effort de flexion en Newtons (ici effort de coupe),

L la longueur de la pièce en mm,

E module d'élasticité = 200 000 N/mm² pour les aciers,
110 000 — bronzes,
90 000 — laitons,
70 000 — alliages d'aluminium,
45 000 — de magnésium.

$I = \dfrac{\pi d^4}{64}$ = le moment d'inertie axial de la section de la pièce (d en mm).

La formule de la flèche devient donc :

$$f = K \frac{FL^3}{Ed^4}.$$

Nous laissons à nos lecteurs, le soin de retrouver les résultats de l'expérience en interprétant cette formule.

2° Au cours des expériences, nous avons pu constater que les flèches et, par suite, les défauts macrogéométriques de surface (défauts de cylindricité), sont amplifiés si les supports des outils sont eux-mêmes déformables : jeu sur la broche, pointe et contre-pointe trop longues, fourreau de la contre-poupée exagérément sorti...

CONCLUSIONS PRATIQUES.

Pour limiter l'importance des défauts de cylindricité, il faut diminuer la flèche prise par la pièce au cours du travail.

A cet effet, il faut :

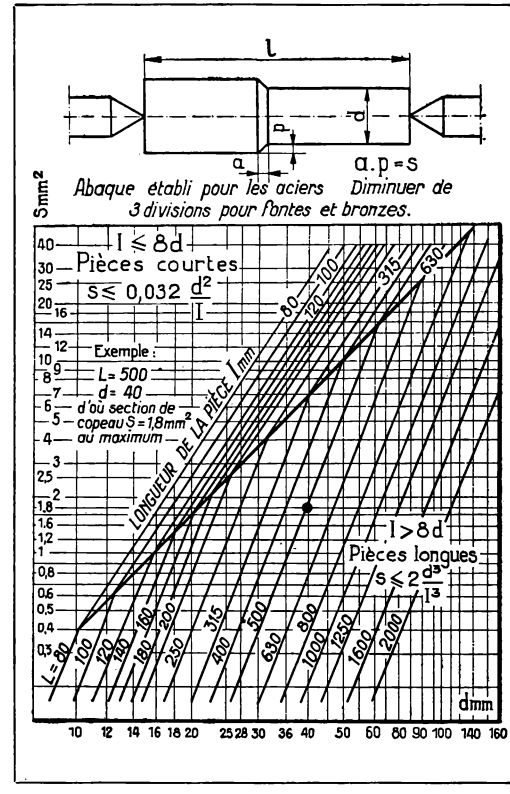
1° ne monter en l'air que les pièces courtes ($l < 2\,d$ pour les pièces cylindriques) ;

2° pour les pièces montées entre pointes, limiter la section du copeau d'après la longueur de la pièce. M. Androuin préconise la détermination de la section du copeau maximum pour l'usinage des aciers $(Rr)_e = 650$ N/mm², au moyen de deux formules

$$\text{si } \frac{l}{d} \leqq 8 \quad s = 0{,}032\,\frac{d^3}{l}$$

$$\text{si } \frac{l}{d} \geqq 8 \quad s = 2\,\frac{d^5}{l^3}$$

L'abaque ci-contre permet de déterminer rapidement la section maximum à donner au copeau.



3° si les pièces sont longues et flexibles, on peut placer une lunette à suivre pour des travaux en très petite série.

Le montage d'une lunette étant une opération longue et délicate, il est souvent plus avantageux de réduire la section du copeau et de faire plusieurs passes.

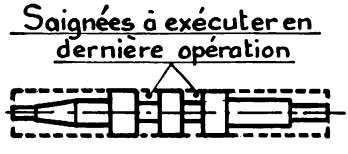


Fig. 29. — Forme d'une pièce tournée en porte-à-faux.

4° on n'oubliera pas de rechercher la gamme d'usinage qui conserve à la pièce, le plus longtemps possible, le maximum de rigidité. En particulier, on n'exécutera jamais en première opération des saignées de dégagement au milieu des pièces entre pointes, ou au ras du mandrin de fixation pour les pièces montées en l'air (*fig.* 29).

SUPPORT ET ENTRAINEMENT DES PIÈCES

Le support de la pièce à tourner doit :

1° Assurer la coïncidence de l'axe de la surface de révolution à produire avec l'axe de rotation de la pièce ;

2° Limiter au maximum les déformations élastiques de la pièce sous l'action des efforts de coupe ;

3° Produire les actions de contact destinées à équilibrer les efforts de coupe, le poids de la pièce et les effets de l'inertie.

En technologie de spécialité, nous avons vu que deux montages sont possibles :

montage entre pointes pour les pièces longues,
montage en l'air pour les pièces courtes.

Montage entre pointes

Principe.

La pièce est soutenue par ses deux extrémités. L'axe de la surface de révolution à produire est l'axe commun des deux surfaces coniques qui constituent les centres de la pièce. L'axe de rotation est l'axe commun des surfaces coniques de la pointe et de la contrepointe.

La coïncidence de ces deux axes est assurée par le contact des surfaces coniques des centres et de celles des pointes du tour.

Si ce problème technique est correctement résolu, on peut, sans inconvénient, retourner la pièce en cours d'usinage : les deux parties tournées seront concentriques.

Réalisation pratique.

Il faut :

— matérialiser l'axe de rotation,
— matérialiser l'axe de la pièce,
— assurer le contact des surfaces coniques des pointes et des centres.

1° Matérialisation de l'axe de rotation.

C'est affaire de réglage de la machine par déplacement latéral de la contre-poupée (voir *Technologie de spécialité*).

Le contrôle du réglage doit être effectué avec un comparateur et un cylindre rectifié.

2° Matérialisation de l'axe de la surface de révolution.

Les axes des cônes constituant les centres de la pièce doivent coïncider. Or, ces centres, usinés au moyen d'une fraise conique ou d'un foret à centrer, sont exécutés sur la machine à centrer, sur la perceuse ou sur le tour.

Le plus souvent, la pièce, brute de laminage, est serrée au moyen d'un étau à mors parallèles, en V, ou d'un mandrin trois mors à serrage concentrique (*fig.* 31). On exécute un centre à une extrémité ; ensuite, on retourne la pièce pour exécuter le second centre (*fig.* 32). Cette opération de retournement n'assure pas nécessairement la coïncidence de l'axe du foret avec celui du trou conique déjà exécuté, et cela pour deux raisons :

a) la pièce étant brute, les génératrices ne sont pas parfaitement rectilignes et parallèles ;

b) les surfaces de contact de l'appareil de fixation avec la pièce (mors de l'étau de la machine à centrer ou du mandrin à serrage concentrique), sont toutes mobiles pendant le serrage. S'il existe un jeu de fonctionnement entre les différents éléments de cet organe, l'axe de la pièce ne se remet pas nécessairement à la même position après chaque serrage.

Notons cependant que, si les dispositifs de fixation sont en bon état, l'erreur de montage qui vient d'être signalée est insignifiante ; on serre en effet sur un même diamètre

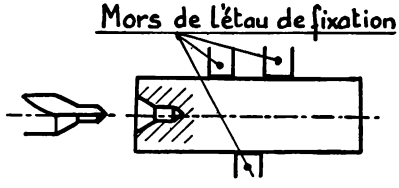


Fig. 31. — Exécution d'un centre sur machine à centrer à une tête, 1re opération.

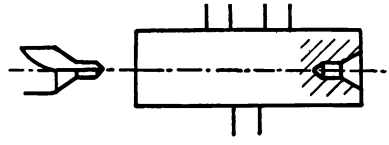


Fig. 32. — Exécution d'un centre sur machine à centrer à une tête, 2e opération.

avant et après retournement et, ainsi, les mors de l'étau et du mandrin et des pièces qui les commandent reprennent la même position.

Trop souvent, les centres ont des axes obliques (concourants ou non), ou parallèles. Les pointes support de pièce portent mal. L'usinage ne peut être parfait. Une correction automatique peut cependant se faire au cours de l'usinage, lorsque le défaut de centrage n'est pas prononcé. En effet, la pièce tourne sur la contre-pointe, qui est fixe ; il se produit un rodage du centre correspondant et, ainsi, l'axe de rotation peut être matérialisé au cours des opérations d'ébauche. On peut retourner la pièce sans risque d'erreur de concentricité pour les passes de finition. Pour mieux assurer ce rodage des centres, certains opérateurs retournent plusieurs fois la pièce au cours des opérations d'ébauche.

Mais l'emploi des pointes tournantes, en supprimant le mouvement relatif de la contre-pointe par rapport au centre de la pièce, a rendu plus apparentes les erreurs de centrage. Ceci explique que l'on ait pu dire que l'emploi d'une contre-pointe tournante rend l'usinage moins précis.

Il faut donc soigner le centrage : l'effectuer au tour, ou sur une machine à centrer *précise*.

Recherche de la précision dans l'usinage des centres.

Les deux surfaces coniques qui constituent les centres sont deux surfaces associées. Conformément au principe général dégagé au début de cet ouvrage, l'usinage des centres doit être fait sans démonter la pièce.

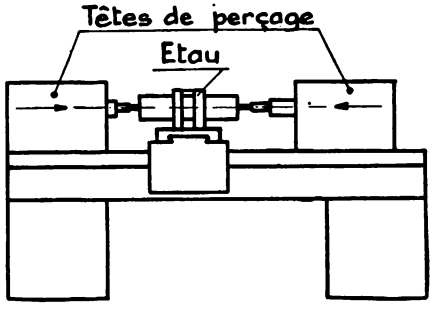


Fig. 33. — Machine à centrer à 2 têtes.

On peut résoudre ce problème de deux façons :

a) utiliser deux outils convenablement réglés : c'est le principe de la machine à centrer à deux têtes (*fig.* 33).

b) N'admettre que le retournement des pièces dont la surface extérieure est calibrée. On applique ainsi à l'usinage des centres, la règle générale : ébaucher d'abord, finir ensuite.

Les centres exécutés en suivant les méthodes habituelles (machine à centrer à une tête avec retournement), servent à l'exécution des opérations d'ébauche.

Les centres seront donc retouchés avant les opérations de finition. La pièce est alors serrée sur une surface cylindrique usinée et les erreurs provenant du retournement de la pièce sont faibles ; on peut, en finition, obtenir une pièce dans les limites des tolérances imposées pour la concentricité.

La retouche des centres en vue de la finition peut se faire :

— sur la *machine à centrer avec une fraise d'angle (fraise conique)*.

Cette méthode est souvent suffisante.

Mais, si la broche de la machine a un peu de jeu, la fraise qui ne doit, au départ, produire des copeaux que sur un seul côté, a tendance à se placer dans l'axe du cône existant. Quand on exige une grande précision, on est conduit à prévoir une pièce plus longue, qui recevra des centres d'ébauche que l'on tronçonnera ensuite pour exécuter les centres de finition d'après l'usinage d'ébauche extérieur.

— *sur la machine à rectifier à deux têtes* (*fig.* 34 et 35).

Chaque meule est animée de deux mouvements : un mouvement de rotation rapide autour de son axe, et un mouvement de rotation lent autour de l'axe du centre à produire (mouvement planétaire). Cette machine est surtout utilisée pour parfaire les centres d'une pièce à rectifier.

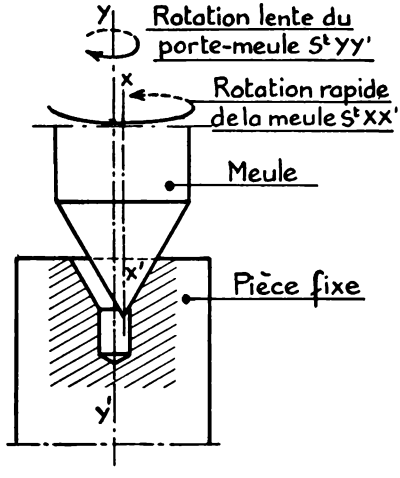
Contact des surfaces coniques des pointes et des centres.

L'angle de pointe généralement adopté est de 60°. Les pointes de tour sont rectifiées. Il existe des machines qui permettent de réaliser avec précision cette opération :

machine spécialement conçue à cet effet, ou machine portative que l'on monte sur le tour.

Les parties coniques des centres sont obtenues au foret à centrer, ou avec un foret ordinaire et une fraise. Il faut utiliser des outils précis, affûtés soigneusement à l'angle de 60°. On recommande particulièrement l'emploi du foret et de la fraise séparés. La plupart des machines à centrer comportent une tête à deux broches : l'une entraîne le foret, l'autre la fraise (vitesses différentes).

La rectification des centres sur les machines décrites plus haut permet d'obtenir



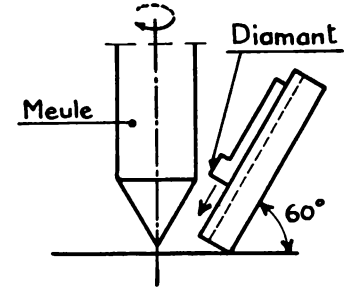


Fig. 35. — Affûtage de la meule de rectification des centres.

◀— *Fig.* 34. — Rectification d'un centre.

l'angle du cône avec certitude. Cette opération s'impose pour le travail de rectification ou de tour quand la tolérance de concentricité correspond aux qualités 6 et au-dessous.

Entraînement des pièces montées entre pointes.

On le réalise le plus souvent avec un toc ; mais cet appareil est dangereux et gênant, et il laisse une marque sur la pièce. Il est mal équilibré et, de ce fait, il engendre des vibrations qui nuisent à la précision du travail, surtout lorsqu'on tourne à grande vitesse pour l'emploi des outils en carbures métalliques. On s'efforce maintenant d'employer des entraîneurs équilibrés, à symétrie axiale.

L'entraînement des pièces montées entre pointes a été considérablement amélioré par l'emploi de plateaux à auto-serrage où sont mis en jeu l'action de mors excentrés qui se coincent sur la pièce et les effets du couple d'inertie dû à leurs masses.

Ces mandrins ne seront pas décrits ici (*fig.* 36) ; ils permettent un entraînement sûr à toutes vitesses et, aussi, le desserrage automatique dès que l'on freine la broche qui les reçoit.

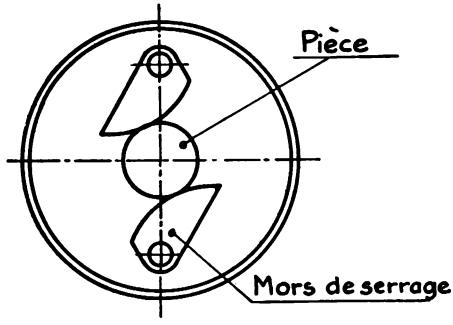


Fig. 36. — Plateau auto-serreur.

Conclusion :

Le montage entre pointes rend plus difficile l'obtention de la précision.

La dilatation de la pièce n'est pas libre, et ceci conduit le tourneur à desserrer légèrement la contre-pointe pendant le travail ; la précision s'en ressent.

Enfin, la contre-poupée limite les déplacements possibles du chariot porte-outil, notamment pour exécuter des cônes.

Montage en l'air

Le montage en l'air convient aux pièces courtes pour lesquelles on ne redoute pas la flexion sous l'action de l'outil ou, tout au moins, une flexion très inférieure à l'intervalle de tolérance prévu. Les pièces sont fixées sur un plateau vissé ou monté par cône sur la broche. Ce mode de montage permet d'exécuter facilement les surfaces de révolution intérieures.

Le blocage diffère selon la forme des pièces. Rappelons très rapidement ici les différents montages étudiés en technologie de spécialité (1).

Pièces de formes quelconques.

Les pièces sont montées sur un plateau à trous. Les règles d'ablocage, dans ce cas, sont les mêmes que pour les pièces montées sur les tables des fraiseuses, des perceuses ou des raboteuses. Mais, en outre, le dispositif de blocage doit s'opposer aux efforts de coupe et aux actions centrifuges (dans le cas des pièces mal équilibrées.)

La face d'appui est perpendiculaire à l'axe de la broche. La mise en place de la pièce peut parfois paraître délicate mais elle est relativement facile si l'on se conforme aux principes suivants.

1° *La pièce possède une surface de référence usinée avant tournage.*

a) *La surface de référence usinée est perpendiculaire à la surface de révolution.*

Cette surface sera mise en contact avec la face du plateau et, si l'outil doit déboucher, sur trois butées fixes, complétées, le cas échéant, par un ou plusieurs

(1) GOUPIL. Le tourneur, Foucher, Éditeur.

appuis supplémentaires automatiques (*fig.* 37 *a* et *b*). La mise en position du trou se fait à l'aide du trusquin, d'après le tracé, ou en enfonçant dans le trou brut la contre-pointe à billes.

Pour des séries importantes, la position de la pièce est définie par le contact

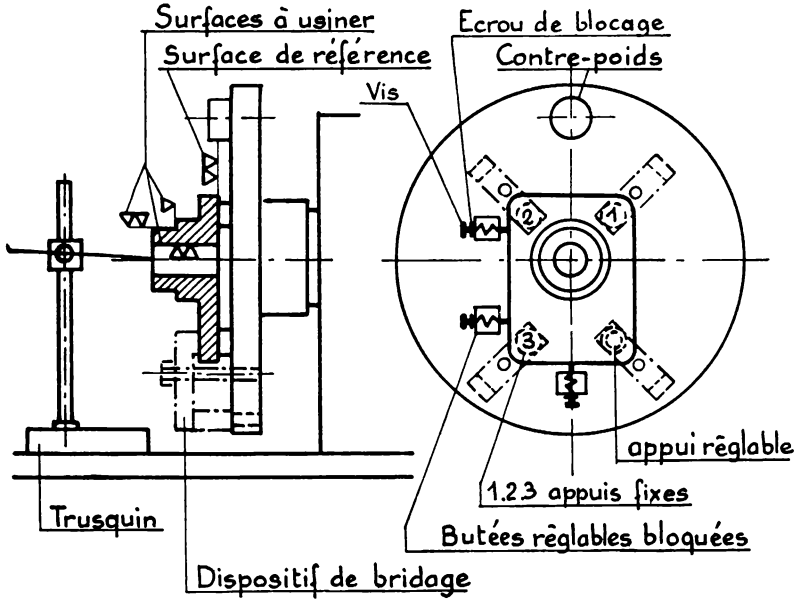


Fig. 37 *a.* — Montage sur plateau d'une pièce ayant une face de référence normale à la surface de révolution.

de trois butées réglables, qui permettent une légère modification dans la position de la pièce si des variations se produisent en fonderie.

b) *La surface de référence usinée est parallèle à l'axe de la surface de révolution.*

La pièce est montée sur une équerre fixée au plateau ; la surface de référence est en contact avec la face de l'équerre (*fig.* 38). Pour les travaux de série, le dégauchissage de la pièce se fait toujours au moyen de trois butées réglables, que l'on bloque : B_1-B_2-B_3.

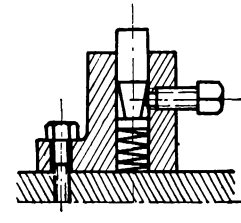


Fig. 37 *b.* — Butée réglable.

La mise en place de l'équerre à la cote A, est obtenue en utilisant un « cochonnet » emmanché dans la broche du tour (*fig.* 39 *a*) ou un cylindre monté entre pointes et une combinaison de cales étalons (*fig.* 39 *b*).

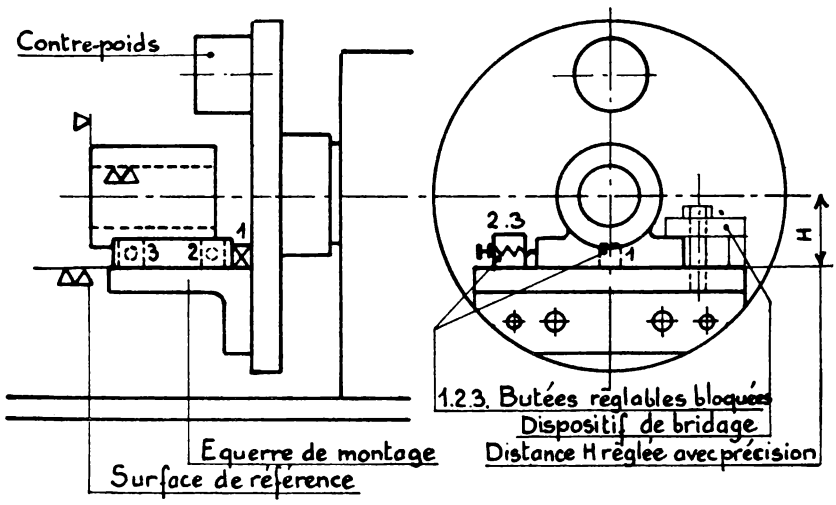


Fig. 38. — Montage sur plateau d'une pièce ayant une face de référence parallèle à l'axe de la surface de révolution.

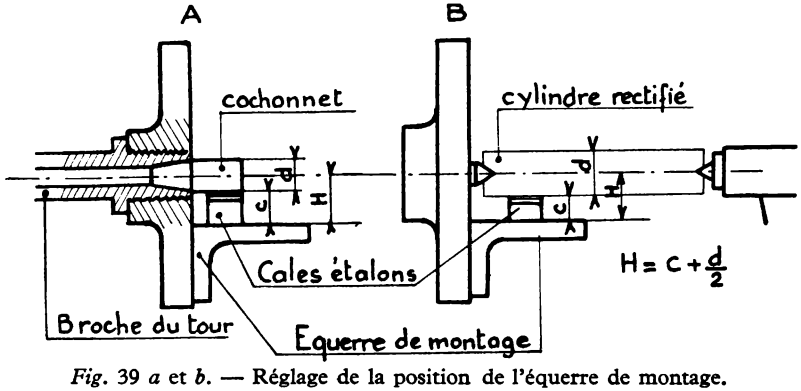


Fig. 39 *a* et *b*. — Réglage de la position de l'équerre de montage.

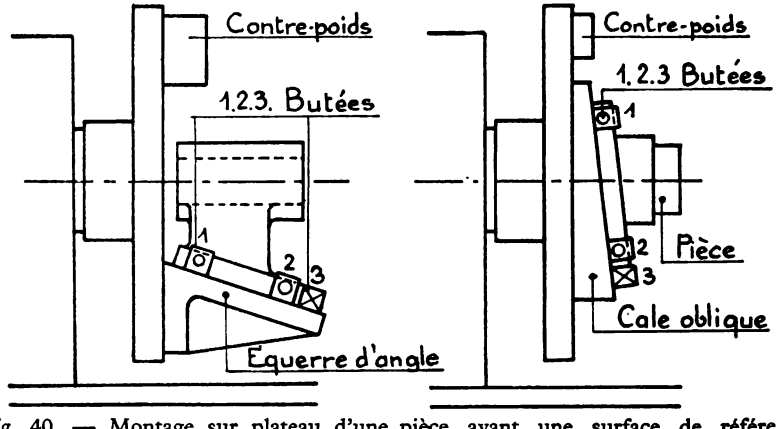


Fig. 40. — Montage sur plateau d'une pièce ayant une surface de référence oblique par rapport à l'axe de la surface de révolution.

c) *La surface de référence est oblique* (*fig.* 40).

On utilise une équerre d'angle, ou une cale oblique.

Le principe de mise en place de l'axe reste le même : trois butées, portant sur deux faces adjacentes brutes.

2° *La pièce possède deux surfaces de référence usinées avant tournage : SR_1 et SR_2* (fig. 41).

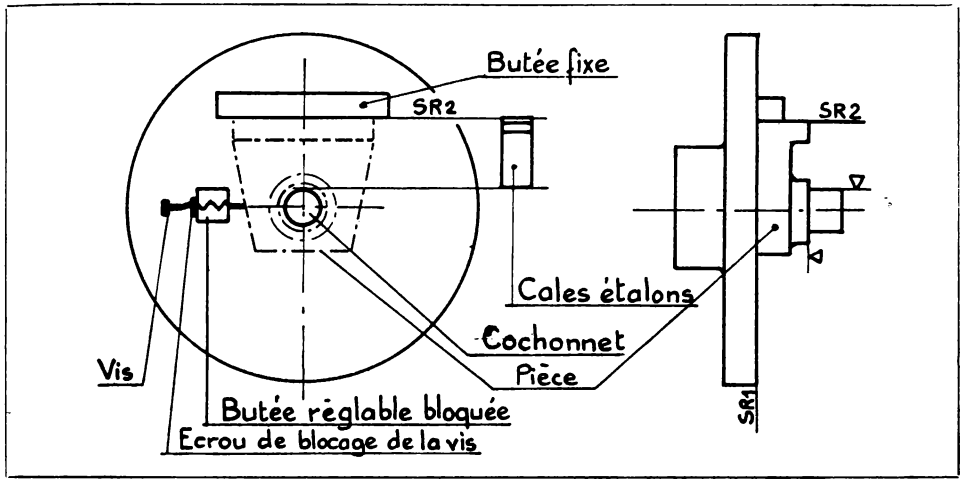


Fig. 41. — Montage sur plateau d'une pièce ayant deux surfaces de référence usinées avant tournage.

La plus grande surface de référence SR_1, sera mise au contact du support : plateau du tour, équerre à 90°, équerre d'angle, ou cale oblique.

La deuxième surface de référence servira à mettre en place l'axe de la partie à tourner. Elle viendra au contact d'une butée fixe dont la position aura été réglée.

Une deuxième butée réglable est également nécessaire.

Trois cas types sont à considérer :

Premier cas. — SR_1 est perpendiculaire à l'axe de la partie à tourner, et SR_2 est parallèle à cet axe. Le montage est représenté par la *figure* 41.

Deuxième cas. — SR_1 est parallèle à l'axe de la partie à tourner, et SR_2 est perpendiculaire à cet axe. Le montage est représenté par la *figure* 42.

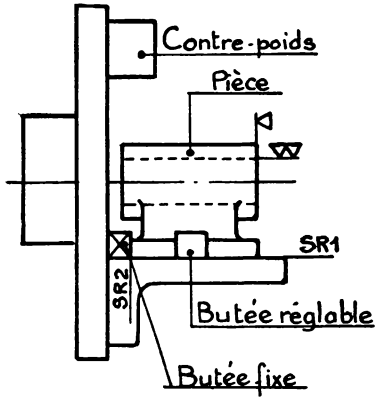


Fig. 42. — Montage sur plateau d'une pièce ayant deux surfaces de référence usinées avant tournage.

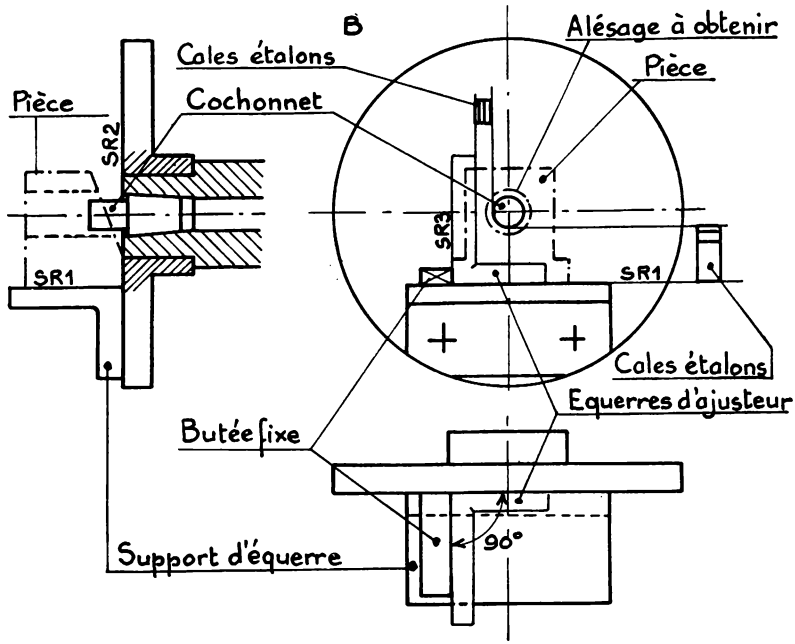


Fig. 44 *b.* — Montage sur plateau d'une pièce qui a trois surfaces de référence usinées avant tournage.

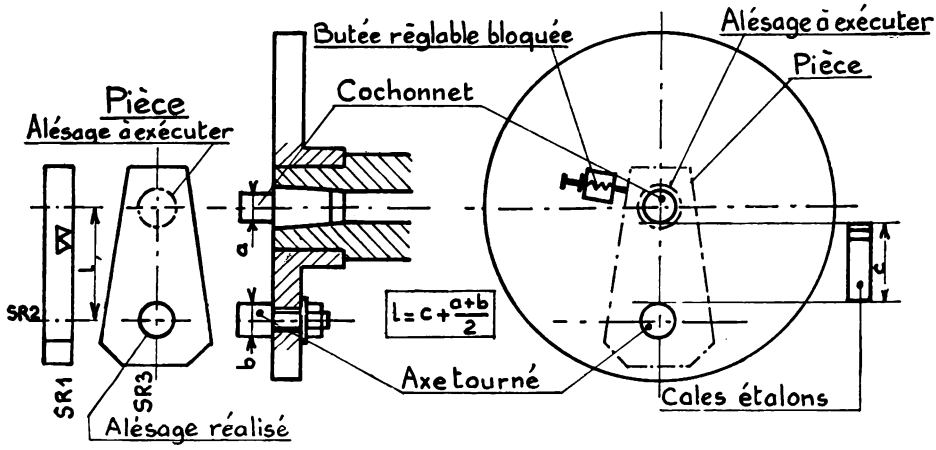


Fig. 45. — Montage sur plateau d'une pièce qui comporte une surface de référence usinée plane et l'intersection de deux autres surfaces de référence (axe d'un trou déjà alésé).

Troisième cas. — SR_1 est parallèle à l'axe de la partie à tourner et SR_2 est oblique par rapport à cet axe (*fig.* 43).

On remarquera, sur les figures précédentes la position des butées dont l'une au moins sert à équilibrer la poussée axiale due à l'action de l'outil.

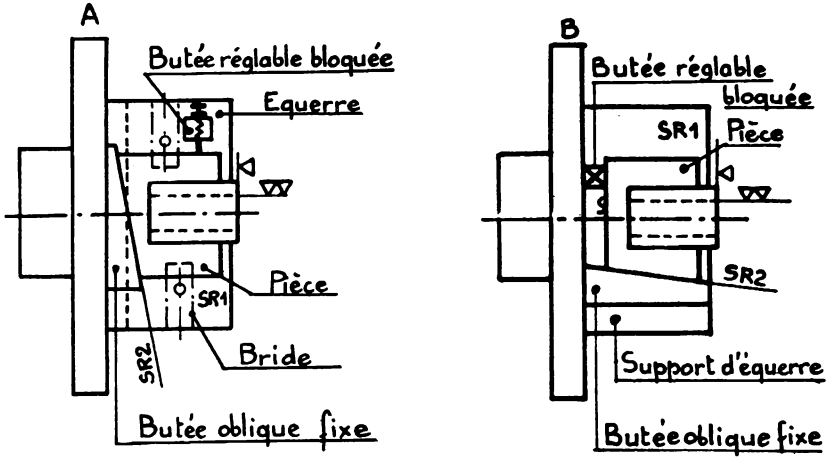


Fig. 43 *a-b.* — Montage sur plateau d'une pièce ayant deux surfaces de références usinées avant tournage.

3° *La pièce a trois surfaces de référence usinées.*

a) *Les surfaces de référence usinées sont des plans extérieurs.*

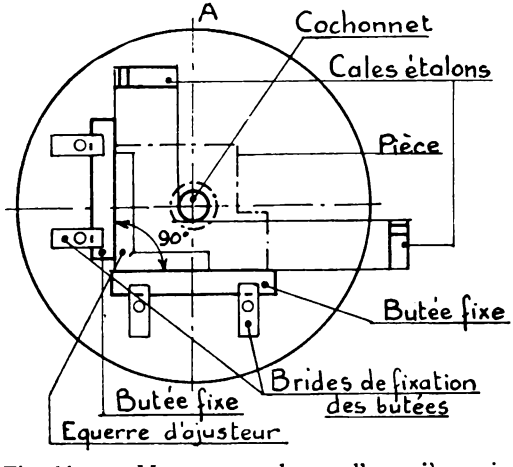


Fig. 44 *a.* — Montage sur plateau d'une pièce qui a trois surfaces de référence usinées avant tournage.

La plus grande sert de face d'appui pour le bridage; les deux autres situent l'axe de la surface de révolution à usiner.

La pièce est montée directement sur le plateau ou sur une équerre (*fig.* 44 *a* et *b*).

Les figures ci-contre illustrent les procédés de mise en position des cales.

La *figure* 44 *a* représente le cas où la plus grande surface de référence, SR_1, perpendiculaire à l'axe du trou, repose sur le plateau. Les butées fixes peuvent être avantageusement remplacées, dans certains cas, par une équerre.

La *figure* 44 *b* représente le montage d'une pièce dont l'axe de la partie à tourner est parallèle à la plus grande surface de référence. La pièce est montée sur équerre.

b) *La pièce comporte une surface de référence usinée plane. On connaît l'intersection des deux autres surfaces de référence, qui est l'axe d'un trou déjà alésé* (*fig.* 45).

On tourne un cochonnet A à un diamètre quelconque ; puis on place en B un axe dont le diamètre *b* est égal à celui du trou déjà alésé. On le règle en position par rapport

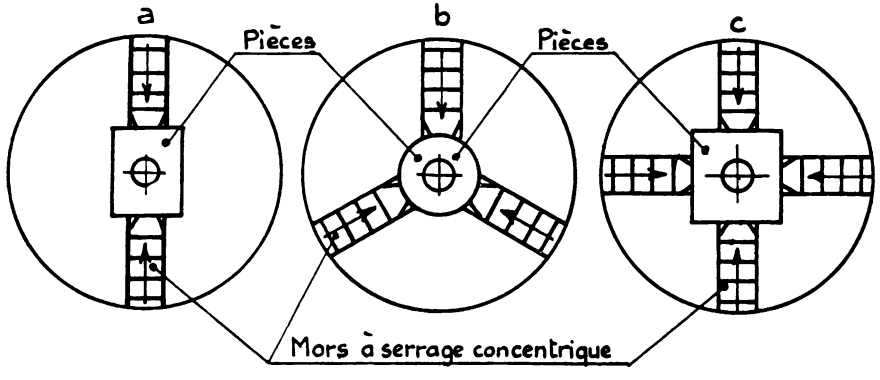


Fig. 46 *a-b-c.* — Mandrins à mors concentriques.

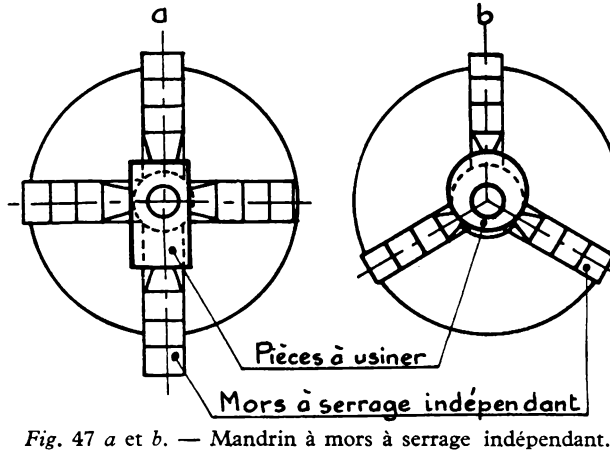


Fig. 47 *a* et *b.* — Mandrin à mors à serrage indépendant.

au cochonnet A, à l'aide d'une combinaison de cales. On ôte le cochonnet et on monte la pièce de façon qu'elle vienne au contact d'une butée qui assure une bonne répartition de matière autour du trou à aléser (balancement à assurer avec une précision faible).

Pièces de révolution ou pièces polygonales.

Le serrage des pièces peut être obtenu par déplacement radial de deux, trois, ou quatre mors.

La commande de ces mors peut être mécanique, hydraulique, ou pneumatique ; les mors peuvent se déplacer séparément ou simultanément (*fig.* 46 *a-b-c*). Dans le premier cas, on emploie les plateaux à deux, trois ou quatre mors, à commande concentrique simultanée. Dans le second cas, on a les plateaux, dits à mors indépendants, qui permettent de serrer des pièces n'ayant pas leur axe de symétrie confondu avec l'axe de rotation, c'est-à-dire avec l'axe de la partie cylindrique à usiner (*fig.* 47 *a* et *b*).

Le montage de la pièce suppose le serrage successif d'au moins deux mors, si l'on admet que les autres mors sont réglés : c'est une opération relativement longue.

Si l'on désire obtenir un serrage plus rapide de pièces comportant un usinage excentré, on peut utiliser des plateaux qui possèdent les qualités des deux types précédents, et qui comportent des mors à serrage concentrique simultané réglables d'autre part sur leur support (*fig.* 48). Ces mors peuvent comporter un usinage particulier des surfaces de contact.

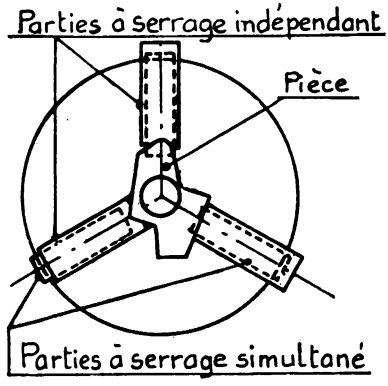


Fig. 48. — Mandrin à mors indépendants réglables et à contre-mors à serrage concentrique à usiner à la forme de la pièce.

ÉTUDE CRITIQUE DES PLATEAUX A SERRAGE CONCENTRIQUE SIMULTANÉ

L'entraînement des pièces est obtenu grâce aux efforts tangentiels de frottement qui prennent naissance entre pièce et mors. Comme ces plateaux doivent permettre le montage des pièces brutes, les mors, qui ne doivent pas se déformer, sont en acier dur trempé. Ce sont les *mors durs ;* ils comportent des stries qui favorisent l'entraînement des pièces en augmentant la pression unitaire ; par conséquent, ils laissent des marques sur la pièce, et nuisent à la qualité du travail obtenu.

Ces plateaux n'assurent pas, pour les différents diamètres, la parfaite coïncidence de leur axe de rotation avec celui des pièces cylindriques serrées. Il suffit, pour s'en assurer, de serrer successivement des pièces tournées et de mesurer l'excentricité avec un comparateur. On constate que ces défauts de concentricité augmentent avec l'âge du plateau.

On peut donc admettre les règles suivantes :

1° *Les mors durs ne doivent entrer en contact qu'avec des surfaces brutes, ou simplement ébauchées ;*

2° *Les plateaux à serrage concentrique et simultané, équipés de mors durs ne peuvent pas être utilisés pour les travaux de reprise directe en finition.*

En conséquence, on peut ébaucher complètement une pièce en mors durs et

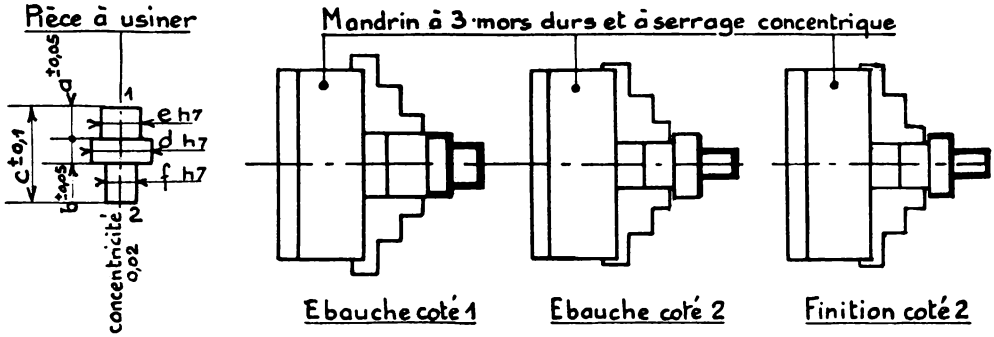


Fig. 49. — Utilisation des mors durs pour l'ébauche et la 1re opération de finition.

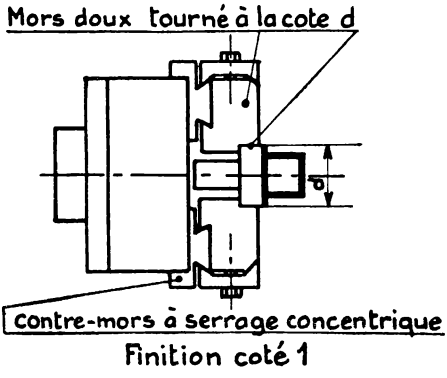
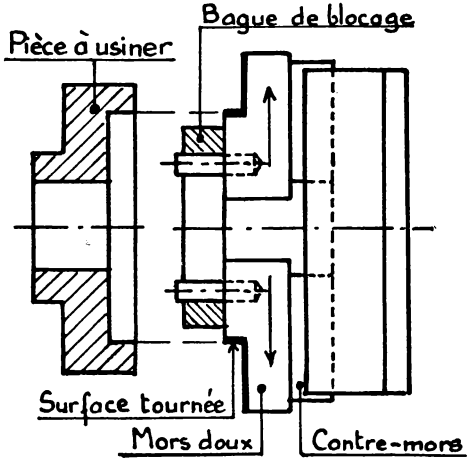


Fig. 50. — Utilisation des mors doux pour la 2e opération de finition.



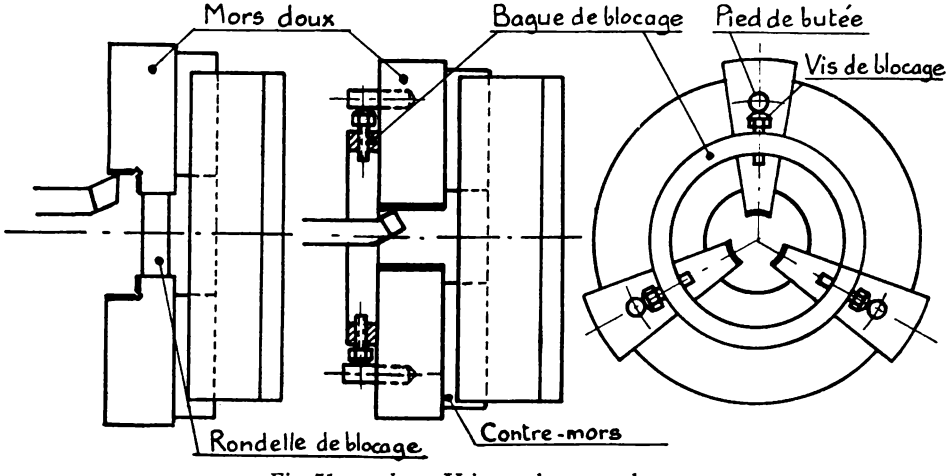


Fig. 51 *a* et *b*. — Usinage des mors doux.

l'achever sur un côté seulement (*fig.* 49). Pour finir le côté II, il faut équiper le plateau avec des *mors doux* (*fig.* 50).

Les mors doux se fixent sur des socles usinés convenablement et insérés dans un plateau à serrage concentrique. Ils sont en acier mi-dur, sans traitement. On les usine en place, au diamètre de la pièce à serrer ; pour cela, les mors serrent un cimblot, ou une rondelle, afin d'assurer leur blocage dans les conditions d'emploi ultérieur (*fig.* 51).

La parfaite concentricité de la pièce et de l'axe de rotation n'est assurée que si le serrage sur le cimblot ou la rondelle se fait exactement dans les mêmes conditions que sur la pièce, c'est-à-dire en agissant sur le même pignon de commande, s'il s'agit d'un plateau à commande mécanique.

L'expérience montre que le couple d'entraînement d'une pièce est relativement faible si le mandrin est équipé de mors doux, et plus important s'il est muni de mors durs, qui pénètrent dans le métal. On en conclut que *les mors doux ne doivent être utilisés que pour des opérations de finition.*

SERRAGE EN PINCES ÉLASTIQUES ET EN MANDRIN EXPANSIBLE

Lorsque les pièces sont de petites dimensions, elles peuvent être prises dans des barres en acier étiré qui sont montées à travers l'alésage de la broche du tour. Elles sont entraînées grâce à une pièce élastique (voir *fig.* 52). La pince est usinée à la forme de la barre et à des cotes assurant un ajustement avec un jeu maximum de quelques centièmes de millimètre.

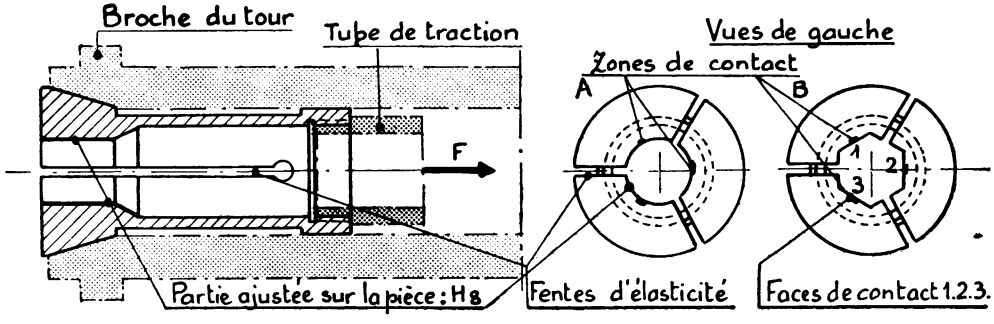


Fig. 52. — Pince pour serrage de pièces en reprise sur leur surface extérieure.

Un effort F exercé au moyen d'un tube fileté grâce à une commande mécanique ou pneumatique assure le contact du cône avant de la pince avec la partie correspondante de la broche.

Comme le corps de la pince est mince et flexible les génératrices de la partie ajustée restent parallèles à l'axe de la pièce. Le contact de la pièce et de la pince est assuré au moins par trois zones le long de trois génératrices. La pince est elle-même entraînée par la broche grâce au frottement des cônes de contact.

On peut monter sur pince des pièces ayant déjà subi une opération d'usinage.

Lorsque les pièces ont déjà été alésées il est possible de les reprendre pour une nouvelle opération extérieure en utilisant un mandrin expansible (voir *fig.* 53).

La concentricité de la surface alésée et de la surface extérieure peut être ainsi assurée avec une précision de 1/100 ou 2/100 de millimètre si le mandrin est en parfait état.

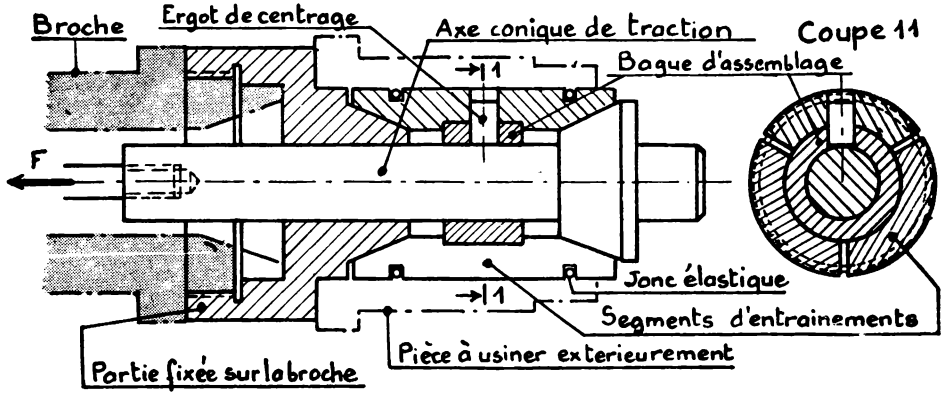


Fig. 53. — Mandrin pour reprise de pièces alésées.

ÉVOLUTION DU TOUR PARALLÈLE

Le tour parallèle est une machine universelle de production des surfaces de révolution : surfaces cylindriques, coniques, de formes (intérieures et extérieures), surfaces planes, filetages intérieurs et extérieurs. Il a été conçu pour la production de pièces à l'unité. Pour obtenir de bas prix de revient et satisfaire une demande croissante, on s'est orienté rapidement vers la fabrication en série, et la diminution des temps d'usinage est devenue le souci constant du constructeur. On a ainsi été amené à modifier les méthodes de travail sur le tour parallèle et à améliorer les formes de ses organes : support d'outil, support de pièce..., puis on a abandonné la forme classique du tour parallèle et l'on a créé les tours spéciaux :

— pour l'usinage des pièces lourdes et encombrantes,
— pour les travaux en série non limitée.

Etudions rapidement cette évolution :

I. — ORIGINE DE L'ÉVOLUTION DE LA FORME DES TOURS POUR LA RÉALISATION DE SÉRIE

Constatation fondamentale à l'occasion de travaux sur tour parallèle.

Le temps de coupe n'est souvent qu'une faible partie du temps total d'exécution, surtout pour les petites pièces. Les temps dits « improductifs », consacrés à la préparation de la machine, au montage de la pièce, au montage et au réglage des outils, à la sélection des vitesses et au contrôle sont, par contre, souvent très importants.

Le montage et le réglage des outils sont les opérations élémentaires improductives qui occasionnent les plus grandes pertes de temps.

II. — RECHERCHE DE LA LIMITATION DES TEMPS IMPRODUCTIFS

A. — Diminution du temps d'équipement de la machine

Equiper un tour, c'est monter les organes de fixation de la pièce et les régler : plateaux, équerres, butées, mandrins, pinces-barres...

Si l'on réussit à employer les organes de fixation sans les démonter pour l'usinage partiel de toutes les pièces d'une série, on utilise plus correctement la machine. Le groupement des opérations à exécuter sur chaque machine tient compte de la règle précédente.

Exemple :

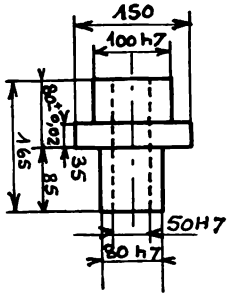
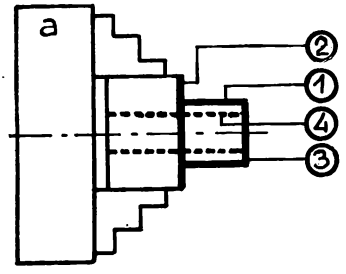
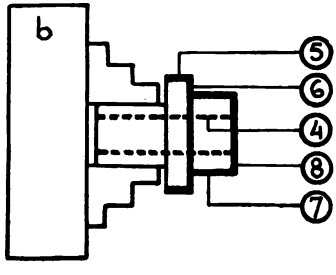


Fig. 54. — Pièce à exécuter.

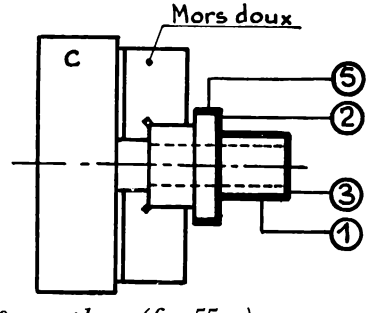
Pièce à exécuter (*fig.* 54) :
pièce brute ; estampée.



1re *sous-phase (fig.* 55 *a)*
effectuée sur toutes les pièces successivement.
Machine équipée de 3 *mors durs*.
a) ébauche de 1, 2, 3, 4,
b) ébauche de 5, 6, 7, 8.



2e *sous-phase (fig.* 55 *b)*,
effectuée sur toutes les pièces successivement.
Finition de 4, 6, 7, 8.



3e *sous-phase (fig.* 55 *c)*,
effectuée sur toutes les pièces successivement.
Machine équipée de 3 *mors doux*.
Finition de 1, 2, 3, 5.

Fig. 55 *a-b-c.* — Phases de l'usinage de la pièce (*fig.* 54).

Plusieurs solutions peuvent être envisagées pour réaliser ce travail :

a) ***Série de moyenne importance.***

Utilisation de machines banales.

Une machine est affectée à la réalisation de chaque sous-phase. Ici on emploiera trois tours parallèles.

b) ***Série « illimitée ».***

Utilisation de machines d'opérations sur lesquelles ne s'effectue qu'une seule opération.

Dans l'exemple choisi on pourrait employer :

ébauche de 1, 2 et 3	1 machine
ébauche de 4.....	1 —
ébauche de 5, 6, 7, 8	1 —
finition de 1, 2, 3	1 —
finition de 5, 6, 7, 8	1 —
1/2 finition et finition de 4.....	1 —

Ces machines d'opération seraient extrêmement simples.

c) ***Série de moyenne ou grande importance.***

Utilisation de machines recevant plusieurs outils susceptibles de travailler simultanément ou successivement.

Dans le cas que nous étudions :

ébauche de 1, 2, 3, 4	1 machine
ébauche de 5, 6, 7, 8 finition de 5, 6, 7, 8 demi-finition de 4 finition de 4	1 machine
finition de 1, 3, 2	1 machine.

On remarquera que, suivant l'importance de la série, le travail sur chacune de ces machines peut être :

— entièrement automatique : commande des outils et alimentation en pièces (tours automatiques à alimentation automatique) ;

— partiellement automatique :

a) l'intervention manuelle peut être réduite à l'alimentation en pièces : tours semi-automatiques,

b) l'intervention manuelle a pour objet l'alimentation en pièces et, en partie, la commande de mise en place et de déplacement des outils : tours à tourelle revolver.

d) ***Série moyenne et grande série :***

Utilisation de machines comportant un seul outil qui décrit la génératrice de contour extérieur et intérieur de la pièce ; c'est le tour à reproduire ou tour à copier. La pièce étudiée ci-dessus ne convient pas particulièrement à l'emploi de ces machines.

REMARQUE.

Devant l'apparition du tour d'opération et des tours à copier, les constructeurs spécialisés dans le tour parallèle lui ont apporté des perfectionnements nombreux qui le rendent pratiquement presque aussi productif; il s'agit surtout de butées, faciles à régler, sur le chariot longitudinal et sur le transversal; cette remarque est uniquement valable pour des pièces ne nécessitant ni perçage, ni alésage. Il est possible aussi d'adapter sur les tours parallèles des appareils à copier.

On voit, par ces quelques exemples, que la tâche du « gammiste » est extrêmement lourde et qu'il doit soigneusement comparer les différentes solutions possibles; à cette condition seulement, il obtiendra le plus bas prix de revient et il aura choisi « la seule bonne manière de faire son travail ».

B. — Diminution du temps réservé au montage de la pièce

1° On réduit le plus possible le nombre des manœuvres imposées à l'ouvrier.

— le mandrin à serrage concentrique, primitivement conçu pour des pièces à symétrie axiale, peut être utilisé pour la fixation de pièces de formes quelconques, par adjonction de mors spéciaux (*fig.* 48).

— les pièces de révolution ou polygonales seront prises dans des barres étirées à froid, que l'on engagera à travers le trou de la broche et que l'on serrera au moyen d'une *pince élastique* (*fig.* 52).

— le blocage des pièces sur plateau ne doit nécessiter que le desserrage partiel et le serrage de 4 vis ou écrous, au maximum.

Pendant le montage, la pièce doit être supportée, afin que l'ouvrier n'ait pas à la maintenir à bout de bras. L'évacuation des copeaux hors du montage doit se faire aisément pendant l'usinage.

2° Dans les fabrications en série, on rend automatiques le montage, le blocage et le réglage en position des pièces.

a) pièces fondues, forgées ou sciées dans la barre : alimentation automatique, distribution en goulotte, et serrage en plateaux pneumatiques,

b) pièces prises dans la barre : le desserrage de la pince, l'avancement de la barre et la mise en place de la butée de barre et, enfin, le serrage, sont automatiques.

Ces dispositifs de mise en position et de blocage sont utilisés sur les tours automatiques.

3° On s'efforce de réduire le plus possible la fatigue de l'opérateur.

Ceci pour les raisons suivantes :

— conservation de la santé de l'ouvrier et, par suite, l'augmentation de la durée de sa vie,

— prolongation de son activité professionnelle,

— constance dans la qualité de son travail (il reste habile plus longtemps),

— diminution des pauses intercalaires, improductives.

Aussi associe-t-on de plus en plus la machine et les moyens de manutention (montage et démontage des pièces lourdes). On emploie le pont roulant et, surtout, les grues sur portiques et les palans individuels.

C'est dans le même esprit que l'on a été amené à créer les tours verticaux, dont le plateau horizontal favorise la mise en place des pièces lourdes et encombrantes.

C. — Diminution du temps consacré à la sélection des vitesses et aux manœuvres en cours de travail

Certains tours sont équipés de boîtes de vitesses et d'avances qui peuvent être manœuvrées pendant la marche. D'autre part, le recours aux variateurs électroniques a permis de réaliser, sans complications mécaniques, la variation continue de la vitesse de rotation de la pièce. On maintient ainsi constante la vitesse de coupe, même quand la trajectoire de l'outil n'est pas une droite parallèle à l'axe du tour. Sur les tours modernes, les commandes sont centralisées sous les mains de l'exécutant : tous les gestes de grande amplitude lui sont évités ; le poste de travail est donc minutieusement étudié. On automatise les gestes de l'opérateur en lui confiant une opération ne nécessitant que quatre à cinq gestes au maximum ; l'ouvrier arrive à les répéter sans effort, en libérant même son esprit.

D. — Diminution du temps de montage et de réglage de la position des outils au début et en fin de passe

Une pièce de tour comporte des surfaces variées : cylindre, cône, plan, tore, hélicoïde, dont la réalisation nécessite l'emploi de plusieurs outils. Ces différents outils se substituaient les uns aux autres sur les anciens tours : il en résultait une grande perte de temps pour rétablir les réglages à chaque pièce nouvelle. D'autre part, il fallait, sur chaque pièce, faire de nombreuses mesures pour obtenir les cotes avec précision, particulièrement en ce qui concernait les longueurs, puisqu'il n'existait aucune butée longitudinalement et pas de vernier.

Les travaux de série ont fait rapidement apparaître la nécessité :

a) de monter et de régler, au début de la série, les outils indispensables à la réalisation de la phase d'usinage ;

b) de concevoir un dispositif qui assurerait avec précision l'arrêt du chariot porte-outil en fin de passe, dans ses différents déplacements.

On a donc complété le tour parallèle et conçu des tours spéciaux : tours dits « revolver », tours de reprise à outils multiples, tours automatiques.

AMÉLIORATIONS APPORTÉES AU TOUR PARALLÈLE

Augmentation du nombre d'outils.

La tourelle porte-outil peut recevoir 4 outils. Sa rotation de 90° est assurée avec précision. *Exemples :* tourelle Cazeneuve, tourelle Cayère-Piquant des tours Ernault..., qui garantissent la remise en position de l'outil à moins de 1/100 mm près, après une rotation complète.

Adjonction d'une *tourelle arrière*, qui peut recevoir deux outils, sur les tours dits d'opération (*fig.* 56).

Contre-poupée équipée pour recevoir des forets, des alésoirs, des tarauds, des filières..

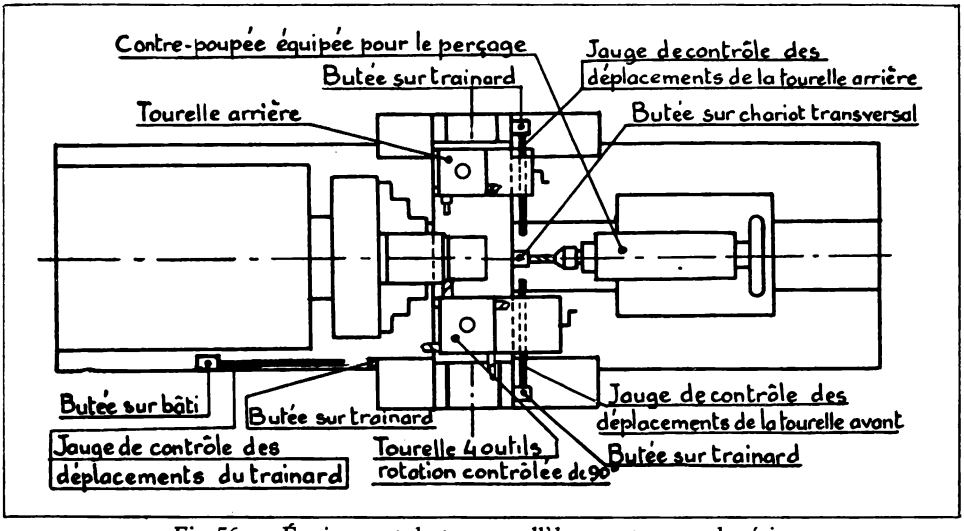


Fig. 56. — Équipement du tour parallèle pour travaux de série.

Le fourreau peut être actionné comme la broche d'une machine à percer, au moyen d'un levier sensitif.

Le blocage de la contre-poupée par excentrique permet de l'amener plus rapidement en position de travail et de l'immobiliser.

Sur le tour parallèle, d'ailleurs, les outils ne travaillent pas simultanément.

Le réglage des outils en position de coupe demande beaucoup de soin et nécessite toujours le contrôle des jeux de fonctionnement des chariots, jeux qui doivent être ramenés au minimum compatible avec un déplacement sans frottement excessif.

L'emploi de la tourelle GOOD-SHAP rend aisés les réglages en hauteur des outils, mais ne permet le montage simultané que de deux outils.

Contrôle des déplacements.

La lecture du déplacement des chariots sur le tambour gradué de la vis de commande conduit assez fréquemment à des erreurs, et, pour des travaux de série, à une perte de temps.

Pour contrôler la course des chariots longitudinal et transversal, on utilise des butées et des jauges étalonnées (*fig.* 56). Un ensemble de mise en butée comprend généralement (*fig.* 57) :

— une butée sur le banc, pour le déplacement longitudinal ; sur le traînard, pour le déplacement transversal,

— un support de jauge,

— une touche de butée, disposée sur la partie mobile (traînard ou chariot transversal).

Pour contrôler le déplacement avec plus de précision (éviter les déformations élastiques de la butée et de la jauge sous l'action de la vis du chariot), on place, sur la

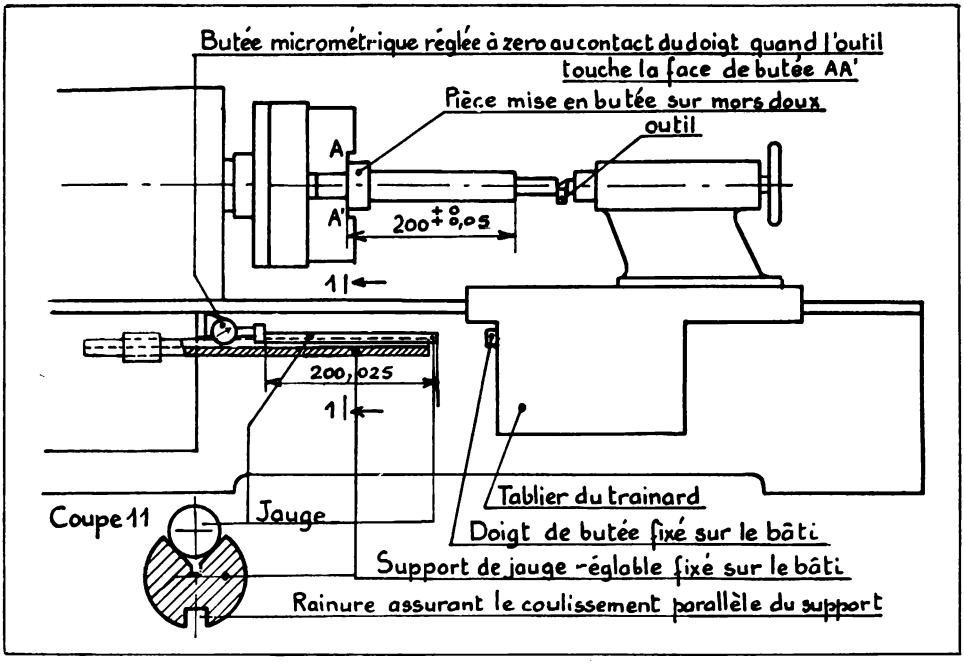


Fig. 57. — Travail en butée sur tour parallèle.

butée fixe, un comparateur à cadran que l'on ramène toujours à zéro avant chaque lecture.

On peut également utiliser un dispositif à déclenchement, qui interrompt (mécaniquement ou électriquement) le déplacement du chariot en mouvement.

Mais le réglage de la butée suppose que la face de référence de la pièce soit toujours en même position dans l'espace. Si la pièce est montée en l'air, cette face de référence doit être mise en butée contre la face plane des mors doux ou contre une butée réglée au début de la série (*fig.* 58 *a*) :

Si la pièce est montée entre pointes, on utilise un dispositif de butée avec pointe sur ressort (*fig.* 58 *b*). L'extrémité déjà usinée des différentes pièces prend ainsi appui contre une face bien dressée servant de référence et ayant une position fixe par rapport au banc du tour.

Augmentation de la puissance du moteur électrique.

Pour augmenter la productivité des machines, on généralise de plus en plus l'emploi des carbures métalliques et l'on s'efforce de couper des copeaux de section importante. L'effort de coupe augmente donc, ainsi que la vitesse de coupe, et la puissance de coupe s'accroît dans de fortes proportions. Il y a vingt ans, un tour qui admettait des pièces

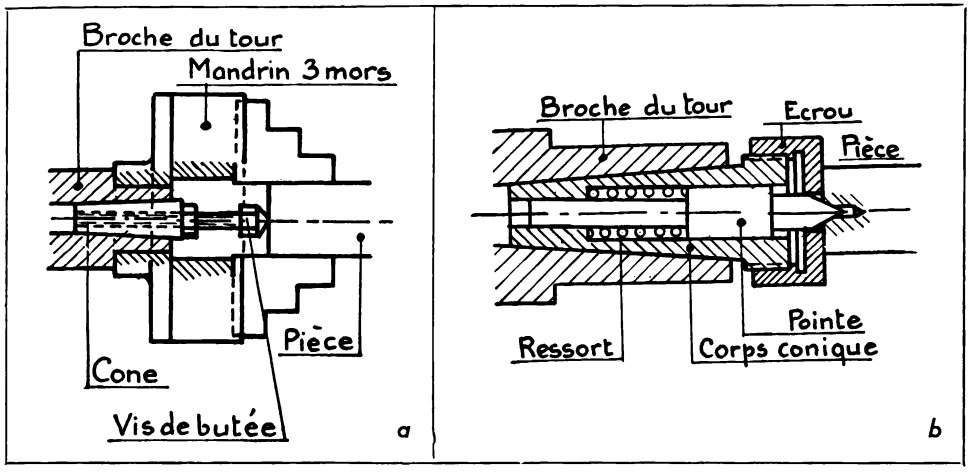


Fig. 58 *a* et *b*. — Dispositif de butée axiale permettant les travaux de série.

de diamètre maximum 400 mm était équipé avec un moteur de 5 ch ; aujourd'hui, le tour de mêmes caractéristiques possède un moteur de 20 ch.

Augmentation des vitesses de rotation et de l'étendue de la gamme des vitesses.

Pour utiliser plus rationnellement les tours, on s'est efforcé d'adapter le mieux possible les vitesses de coupe aux matériaux à usiner, aux différents diamètres des pièces, et aux diverses opérations : chariotage, alésage, filetage, etc.
En l'absence d'un variateur de vitesses efficace, on a conçu des boîtes de vitesses qui, entraînées par un moteur à deux vitesses, offrent une gamme très étendue avec de nombreuses combinaisons. Les régimes élevés sont indispensables pour tirer des outils en carbures métalliques le maximum de rendement et pour usiner les alliages légers. Il est courant de disposer, sur un tour de 32 vitesses, échelonnées de 32 à 3 200 t/mn.

Conclusion.

Les constructeurs de tours parallèles à charioter, ou à charioter et fileter, s'efforcent de rendre cette machine toujours plus productive et plus universelle, afin de permettre des opérations multiples sur des pièces de formes très variées.

Ce type de tour convient surtout aux industries travaillant en très petite série sur des pièces très différenciées et que l'on n'est pas sûr de retrouver dans les commandes futures ; on évite ainsi de créer des outillages spéciaux plus ou moins complexes mais toujours coûteux et d'amortissement difficile.

LE TOUR A TOURELLE REVOLVER

Le tour dit « revolver » a été conçu pour usiner des pièces prises dans la barre ou reprises sur plateau après un usinage précédent.

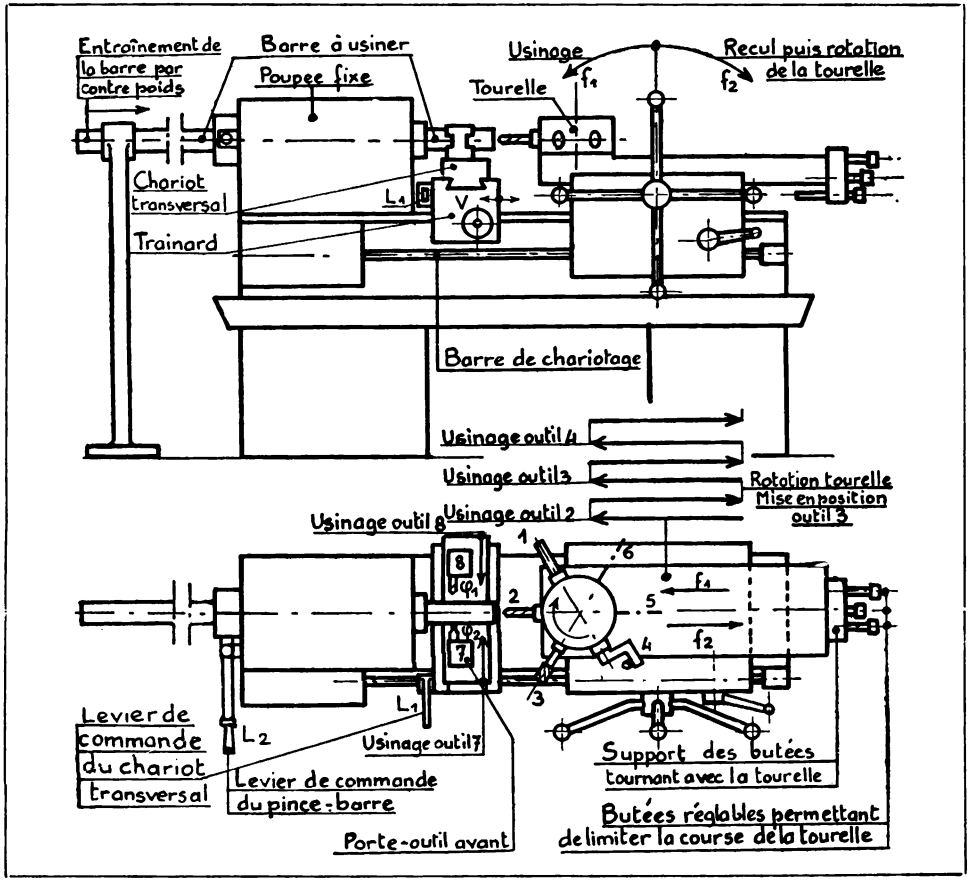


Fig. 59. — Tour à tourelle revolver.

La conception de cette machine répond aux préoccupations suivantes :

— mettre en œuvre un grand nombre d'outils ;

— faire agir les outils les uns après les autres ;

— régler les outils une fois pour toutes entre deux affûtages : leur position de réglage, devant se retrouver automatiquement, avec précision et sans tâtonnement ;

— limiter, par des butées commandées, les courses d'avance des outils ;

— réaliser le blocage et la mise en place rapide de la pièce à l'aide de dispositifs appropriés.

Réalisation.

Sur la *figure* 59, qui représente un tour à tourelle revolver, on remarque que les différents outils sont montés sur trois supports :

— l'un peut se déplacer parallèlement à l'axe du tour : la tourelle-revolver,

— les deux autres se déplacent perpendiculairement à cet axe : porte-outil avant et porte-outil arrière.

Tourelle-revolver.

Les principaux outils sont montés sur la tourelle cylindrique ou prismatique (hexagonale en général). Cette tourelle peut tourner autour d'un axe et, par ce mouvement, amener successivement les outils dans leur plan de travail, qui contient d'ailleurs l'axe de rotation.

Elle est montée sur un chariot qui lui donne un mouvement rectiligne pendant le travail des outils (flèche f_1). Quand la passe est terminée, le mouvement se produit en sens inverse (flèche f_2), dégage l'outil, et provoque, en fin de recul, la rotation de la tourelle qui amène l'outil suivant en position de travail et le cycle continue. La course de travail est limitée par des vis portées par un barillet qui tourne en même temps que la tourelle ; ces vis viennent successivement au contact d'une butée fixe. En réglant ces vis, on règle la course de chaque outil.

Porte-outils avant et arrière.

Les deux porte-outils sont montés sur un chariot qui se déplace sur un « traînard » et glisse sur le banc parallèlement à l'axe des pointes. Les déplacements du chariot suivant 7 et 8 sont limités par des butées réglables. La course du traînard est aussi limitée par des butées réglables.

Il peut être immobilisé avec précision en une position quelconque.

Différents types de tours revolvers.

1° Les petits tours à tourelle revolver sont à commande manuelle : l'ouvrier doit manœuvrer le chariot porte-tourelle à l'aide d'une manivelle à quatre bras (cabestan), le chariot transversal à l'aide d'un levier L_1 (ou par vis et écrou), et le traînard au moyen du volant V. Le pince-barre est actionné à la main, au moyen du levier L_2.

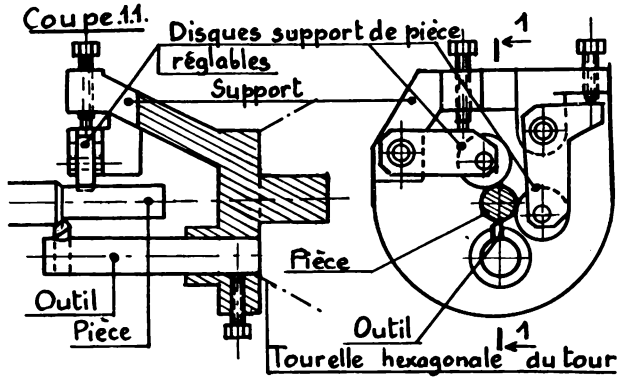


Fig. 60. — Outil de tour revolver pour usinage de pièce flexible.

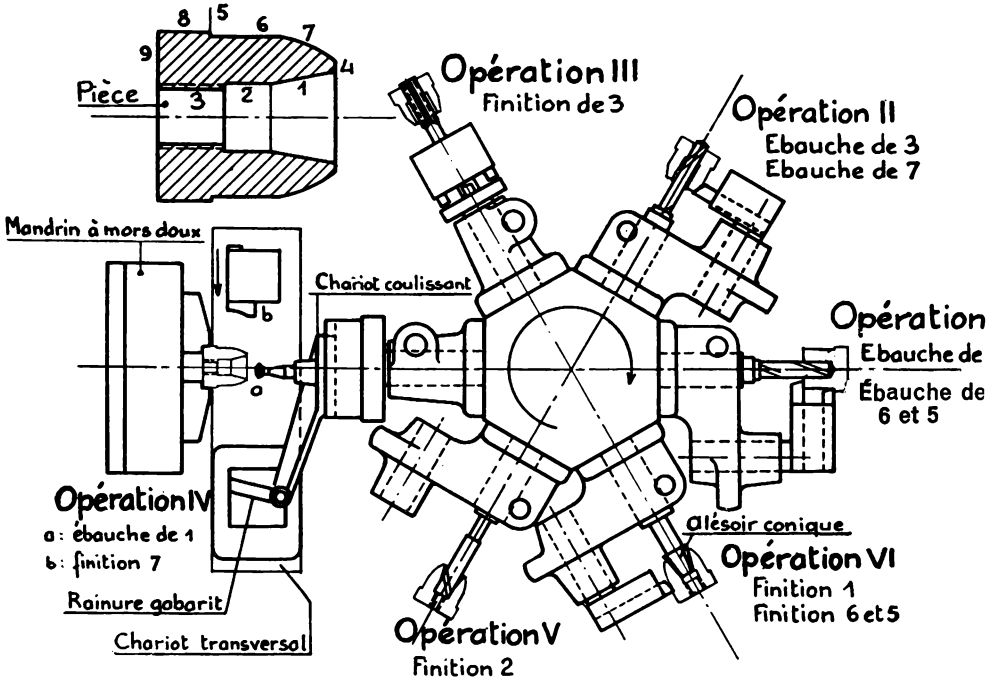


Fig. 61. — Épure relative à l'exécution d'une pièce sur tour revolver.

L'avance de la barre peut être obtenue manuellement ou à l'aide d'un dispositif à contrepoids. S'il s'agit de pièces montées sur un plateau, le montage et le démontage des pièces est manuel. L'ouvrier inverse la rotation de la barre, ou l'arrête, en agissant sur un contacteur-inverseur à boutons-poussoirs.

Ces tours sont appelés *tours-revolvers à commande manuelle.*

2° Sur d'autres tours, les mouvements d'avance sont automatiques. Le déplacement du chariot portant la tourelle est mécanique, au moins dans le sens de travail ; il est commandé par une barre de chariotage. La butée de fin de course assure le débrayage du mécanisme. Les mouvements du chariot transversal et du traînard peuvent également être mécaniques. La présence permanente d'un ouvrier devant le tour est donc indispensable tant pour assurer les manœuvres que pour l'alimenter en pièces.

Ces tours sont dits : *tours revolvers semi-automatiques,* ou encore *tours revolvers à combinaisons.*

Travaux exécutés.

On peut exécuter, sur des pièces prises dans la barre en l'air, ou montées en mandrin, toutes les opérations de tournage extérieur et intérieur. Pour les pièces longues, on monte sur la tourelle le foret et la fraise pour exécuter un centre, et une contrepointe pour soutenir la barre. Dans ce cas, l'usinage est obligatoirement réalisé par les outils du chariot transversal. Les chariots avant et arrière sont, le plus souvent, utilisés pour des opérations de tronçonnage, de dressage, de chariotage extérieur cylindrique ou conique. Le chariotage conique exige, comme sur le tour parallèle, l'emploi d'un reproducteur lié au chariot transversal. Les petits cônes extérieurs ou intérieurs s'obtiennent avec une lame de forme. Les cônes longs, extérieurs, sont exécutés à l'aide des porte-outils avant et arrière.

Les outils montés sur la tourelle revolver permettent d'effectuer du chariotage cylindrique extérieur et intérieur, des alésages à l'outil, à la barre ou à l'alésoir, du filetage à la filière à déclenchement automatique, et du taraudage à l'enfilade ou au taraud monté sur un porte-taraud à dégagement ou à débrayage automatiques.

Les outils sont montés sur des porte-outils spéciaux pouvant recevoir plusieurs outils. Pour le chariotage sur pièces longues, on utilise deux galets afin d'équilibrer l'action de l'outil ; galets et outil sont montés sur un même porte-outil fixé sur la tourelle ou sur les chariots avant et arrière (*fig.* 60). L'équipement en outils de la machine est fonction du nombre de pièces à produire. En règle générale, les outils standards doivent être utilisés par priorité. Pour des séries importantes, on peut concevoir un outillage spécial, sous réserve que les économies de temps réalisées en permettent l'amortissement.

On recommande d'exécuter une épure sur papier calque afin de déterminer avec précision les outillages à prévoir. Afin de faciliter le travail, l'épure est faite sur trois feuilles de calque que l'on superpose ensuite pour examiner les différentes phases de l'exécution. Sur l'une sont représentés la pièce et le mandrin, sur la seconde la position des outils sur le chariot transversal, et sur la troisième l'équipement de la tourelle.

On obtient, par superposition, un tracé que représentent les *figures* 61-62. La mise

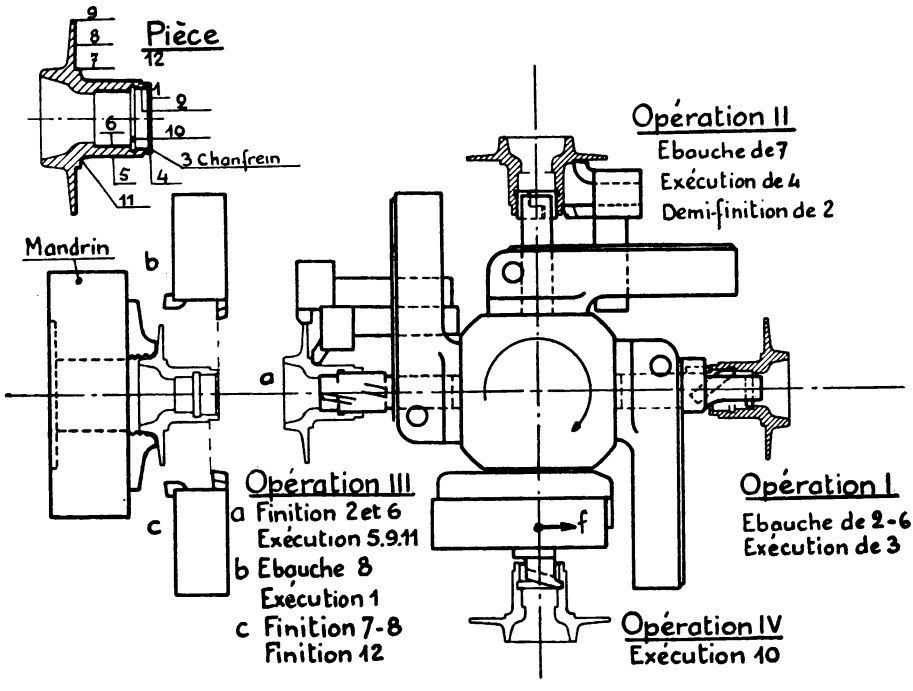


Fig. 62. — Épure réalisée à l'exécution d'une pièce sur tour revolver.

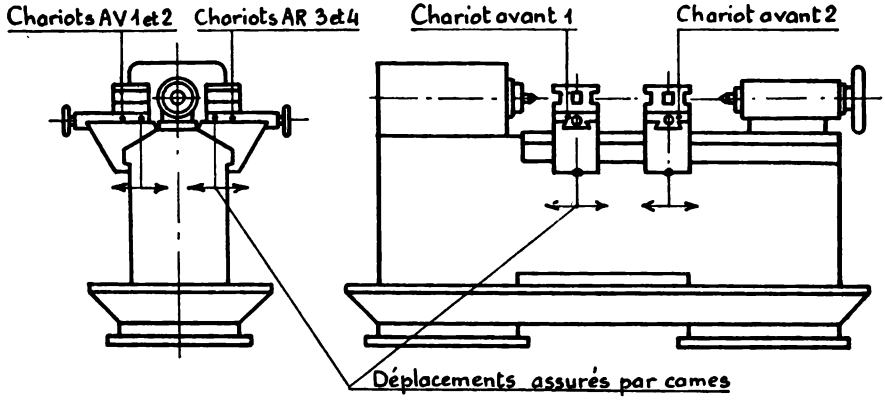


Fig. 64. — Tour à outils multiples.

en place des outils se fera à l'aide de calibres en tôle (*fig.* 63). Le réglage des butées, effectué approximativement à l'aide des appareils de mesure usuels, est parfait ensuite en usinant deux ou trois pièces d'essai.

Pour mieux montrer les possibilités du tour à tourelle, nous avons représenté sur les figures l'épure d'usinage de deux pièces. On pourra constater, à la lecture de la gamme d'usinage, que les règles générales de travail ont été respectées : l'ébauche d'ensemble précède toujours la finition, et la suite des opérations permet de conserver le maximum de rigidité à la pièce aussi longtemps que possible.

Choix du tour revolver.

Pour une même pièce, les temps d'équipement et de réglage d'un tour revolver sont plus longs que pour le tour parallèle, mais les temps d'exécution sont plus courts. Si T est l'augmentation du temps d'équipement et de réglage, t l'économie de temps

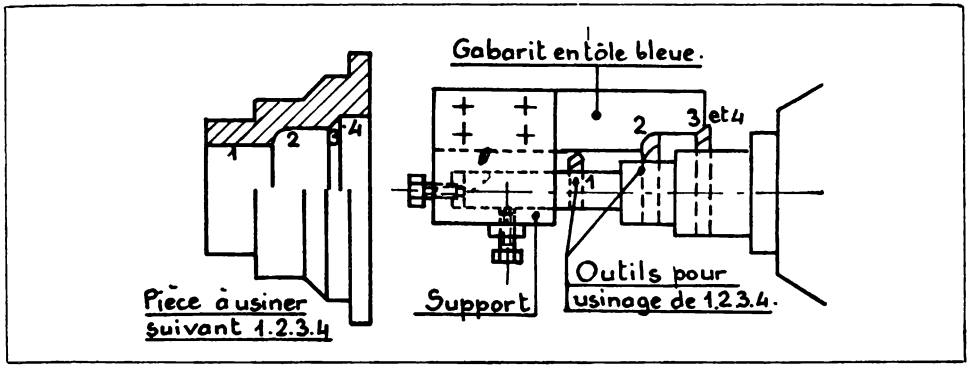


Fig. 63. — Réglage des outils à l'aide de gabarits.

par pièce, et n le nombre minimum de pièces à réaliser, pour que l'usinage sur le tour revolver soit économique, on doit avoir :

$$nt > \mathrm{T}, \quad \text{d'où} \quad n > \frac{\mathrm{T}}{t}$$

On peut admettre que le tour revolver semi-automatique est économique à partir de séries de 10 à 15 pièces ; on descend même parfois à 5 pièces.

Ainsi le tour parallèle tend à ne plus être qu'une machine de l'atelier d'outillage ou de l'atelier d'entretien où l'on exécute surtout des pièces unitaires. Il ne conserve sa place dans les ateliers de mécanique générale que pour les travaux à l'unité ou en série très petite.

TOURS SEMI-AUTOMATIQUES A OUTILS MULTIPLES

Les tours à tourelle revolver, ne possèdant pas de contrepointe, sont plus spécialement adaptés au travail en l'air sur des pièces courtes.

Les tours à outils multiples offrent les mêmes possibilités que les tours parallèles, mais plusieurs outils peuvent travailler simultanément (*fig.* 64).

Comme les tours parallèles, ils ont une poupée fixe et une contre-poupée, mais ils possèdent en outre deux chariots indépendants : l'un à l'avant et l'autre à l'arrière, qui peuvent tous deux recevoir plusieurs outils. Généralement, l'un d'eux est animé en translation parallèle à l'axe des pointes, et l'autre se déplace perpendiculairement à cette direction. Sur chaque chariot, il existe un dispositif qui permet de donner une translation oblique à un outil pour la réalisation des cônes ou de pièces à génératrice courbe.

Les chariots sont, en général, commandés par un arbre à cames, disposé à l'intérieur

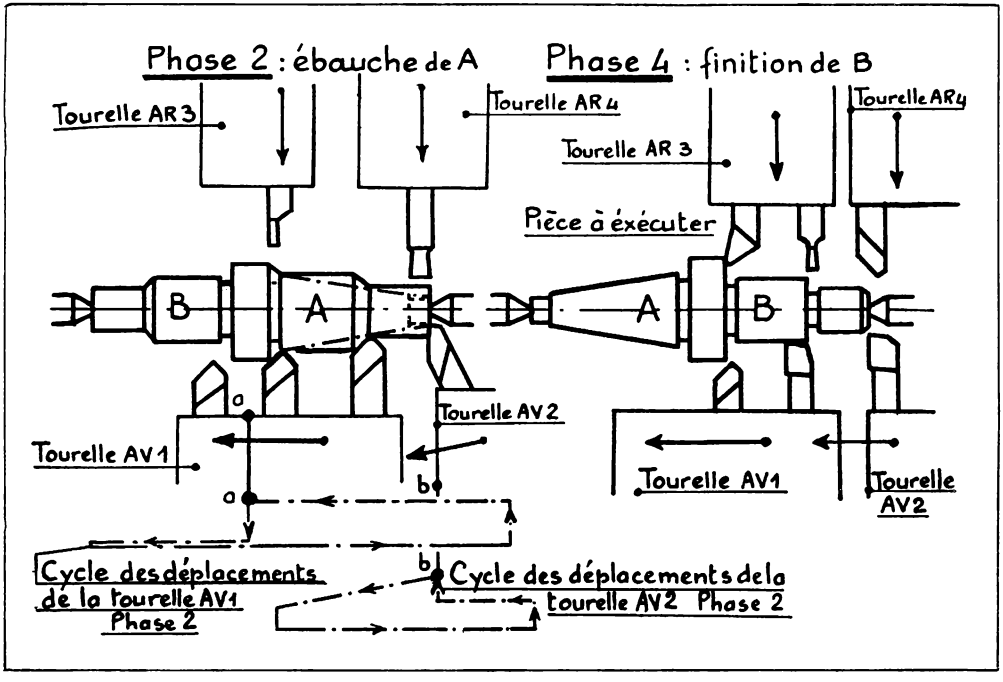


Fig. 65. — Schéma d'une phase d'ébauche et de finition sur tour à outils multiples.

du banc, qui permet de réaliser des cycles de travail automatiques particulièrement intéressants pour les travaux en série.

Ces tours sont utilisés pour usiner des pièces en série de moyenne importance : 10 à 2 000 pièces.

On effectue le travail phase par phase. Le tour est équipé pour une phase : ébauche du premier côté, puis ébauche du second ; finition du premier côté et, enfin, finition du second.

Le schéma (*fig.* 65) relatif à une phase d'ébauche et une phase de finition d'une pièce montre le parti qu'il est possible de tirer de telles machines.

TOURS AUTOMATIQUES

Sur les tours semi-automatiques, l'opérateur assure l'avance de la barre ou la mise en place de la pièce ; il embraye les commandes de la tourelle et des chariots AV et AR. Il inverse le sens de rotation de la broche pour les opérations de taraudage et de filetage.

La durée de toutes ces opérations manuelles dépend de l'activité de l'ouvrier ; leur répétition engendre la monotonie et la fatigue.

On a créé, pour pallier ces inconvénients, des tours automatiques où l'ouvrier n'intervient que pour changer de barre (alimentation du tour). Sur ces machines, le pince-barre, la tourelle hexagonale et les différents chariots sont commandés par des cames et des leviers : on étudie un jeu de cames pour chaque type de pièce à usiner.

Quand on veut usiner des pièces reprises en plateau, on peut, si la série le justifie, créer un distributeur automatique. En général, l'ouvrier place la pièce, à la main, dans le plateau qui, le plus souvent, est actionné hydrauliquement ou pneumatiquement.

Quand on équipe le tour, on s'efforce de faire agir les outils dans le minimum de temps : un outil avance pendant qu'un autre recule, on perce pendant un chariotage, le tronçonnage commence pendant un taraudage, etc. Les cames sont étudiées au Bureau des Méthodes et l'atelier d'outillage les construit.

L'équipement des tours automatiques est toujours assez coûteux et long à réaliser ; il faut que ces frais puissent être amortis sur des séries suffisantes. Ce tour est donc idéal pour la visserie et le décolletage courant. Mais la main-d'œuvre est très réduite : un même ouvrier peut s'occuper de 2 ou 3 machines, tandis qu'un régleur suffit pour 6 à 8. L'économie de main-d'œuvre est de l'ordre de 40 à 50 %.

Différents tours automatiques.

Ces tours sont conçus pour usiner :

a) une seule pièce à la fois, sur laquelle tous les outils interviennent : ce sont les tours monobroches ;

b) plusieurs pièces à la fois : ce sont les tours multibroches, à 4, 6 ou 8 postes.

Tours monobroches.

Les tours monobroches sont de deux types :

— les tours dont la poupée porte-broche est fixe ;

— les tours dont la poupée porte-broche est animée en translation pendant le travail ; ce mouvement est parallèle à l'axe de la broche.

a) Tours à poupée porte-broche fixe (*fig.* 66).

Ils dérivent du tour revolver semi-automatique, et comportent :

- des porte-outils avant et arrière montés sur un chariot transversal animé d'un mouvement perpendiculaire à la broche,

- une tourelle-revolver qui peut se déplacer parallèlement à la broche,
- quelquefois, un ou plusieurs chariots agissant en chariots transversaux, mais dont les glissières sont disposées obliquement par rapport au plan horizontal (*fig.* 67 vue 11).

Tous les chariots sont commandés par des cames et des leviers.

L'avance de la barre est également automatique ; elle est obtenue au moyen

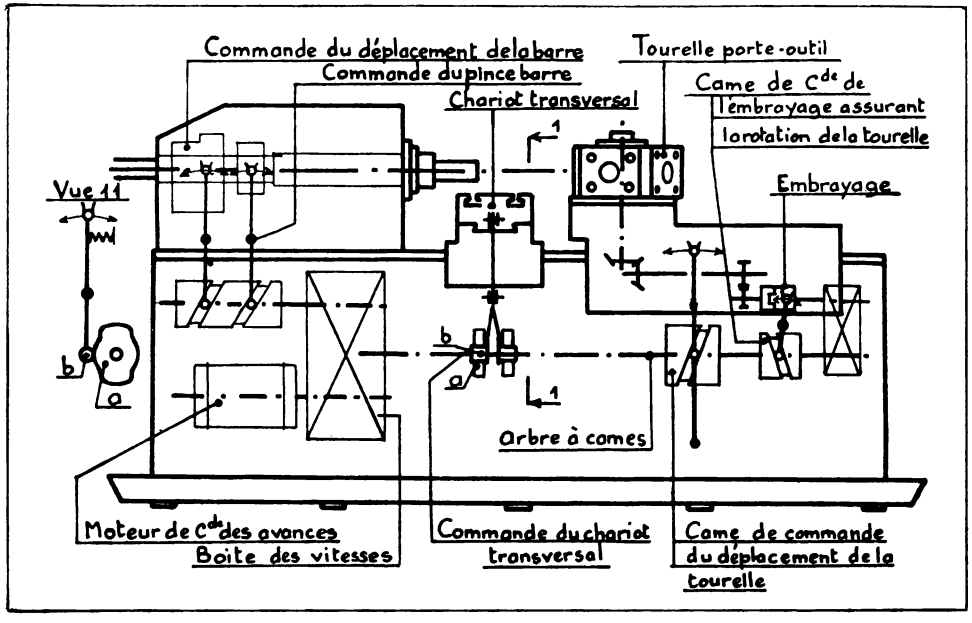


Fig. 66. — Tour automatique monobroche à poupée porte-pièce fixe.

d'une pince-barre et d'un dispositif d'amenage automatique, commandés par leviers et cames.

La *figure* 66 représente schématiquement un tour de ce type.

b) Tours à poupée porte-broche mobile.

Les porte-outils sont toujours rayonnants : ils ont un mouvement de translation normal à l'axe de la broche.

On peut monter, sur la poupée arrière, des outils de perçage, d'alésage, des tarauds ou des filières.

La poupée porte-broche entraîne la barre dans son déplacement parallèle à l'axe de rotation : c'est le mouvement d'avance. Un canon, lié au banc, alésé au diamètre de la barre et placé dans la zone d'action des outils, empêche la flexion de cette barre. La *figure* 67 représente le schéma d'un tour de ce type.

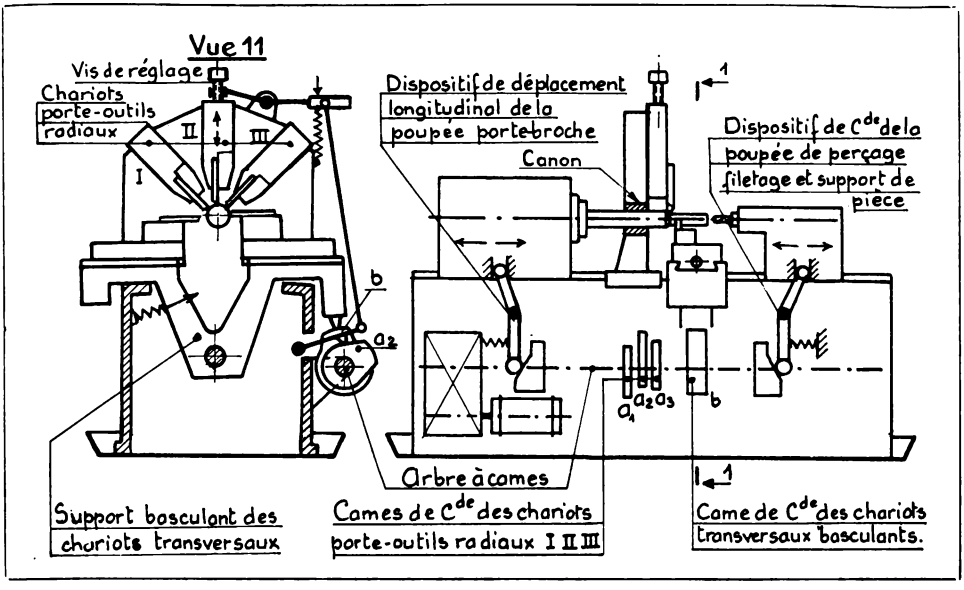


Fig. 67. — Tour automatique monobroche à poupée porte-pièce mobile.

Tours multibroches.

Les tours multibroches dérivent des tours précédents.

Au lieu de faire tourner une tourelle porte-outils, ou de faire agir sur une même pièce les outils montés sur plusieurs chariots radiaux, la barre passe successivement devant chaque outil.

Ces outils se déplacent parallèlement à l'axe de la pièce ou perpendiculairement à lui. Les différents chariots sont commandés par leviers et cames. L'avance des barres s'effectue automatiquement. Les broches de ces tours peuvent être horizontales ou verticales.

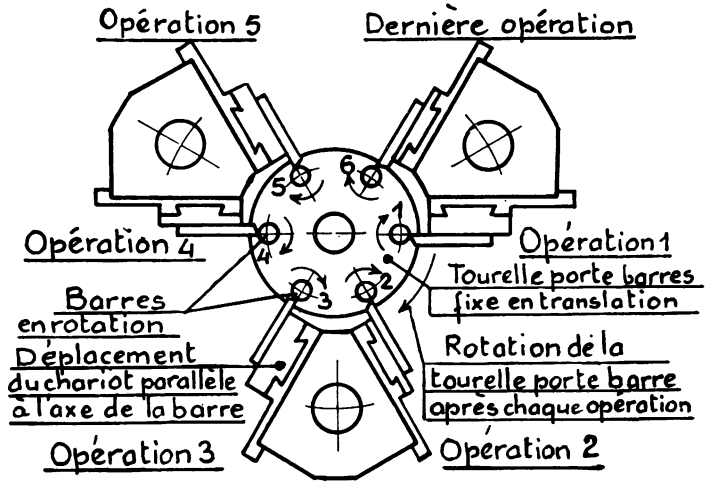


Fig. 68 *a.* — Tour à 6 broches verticales Gyromatic (vue de dessus).

Les marques les plus connues sont : Gridley, Potter, avec barres horizontales (*fig.* 68 *b*) ; Gyromatic (à Tavannes, Suisse) construit un tour à broches verticales (*fig.* 68 *a*). Ce dernier type de tour tient moins de place, mais ne peut être placé que

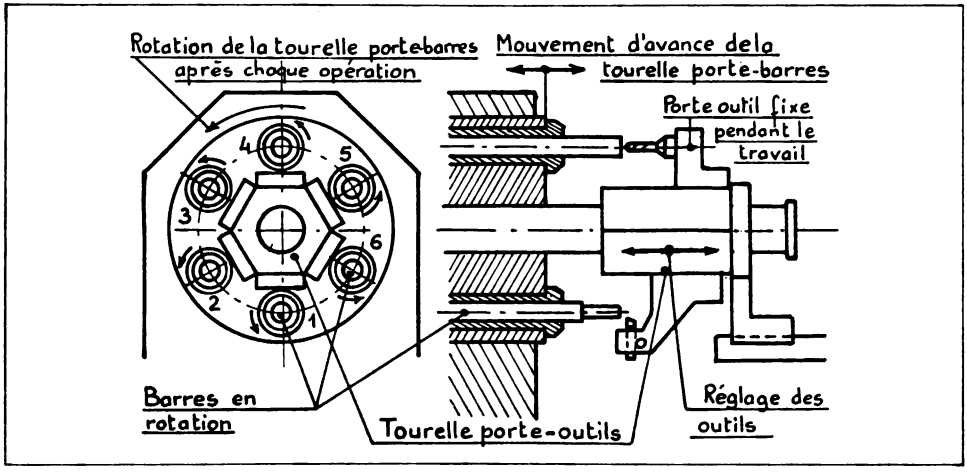


Fig. 68 *b*. — Tour à six barres horizontales.

sous un toit suffisamment haut ; la manutention des barres est un peu plus difficile, mais leur avancement se fait par gravité.

Ces tours sont très productifs et sont employés pour les très grandes séries.

Pour l'usinage de pièces moulées ou estampées, on utilise des tours verticaux comprenant plusieurs plateaux horizontaux (fig 69).

L'ensemble tourne et chaque plateau vient s'immobiliser devant les différents porte-outils.

Le mouvement d'avance est donné aux chariots porte-outils.

La commande des différents organes en mouvement est entièrement automatique.

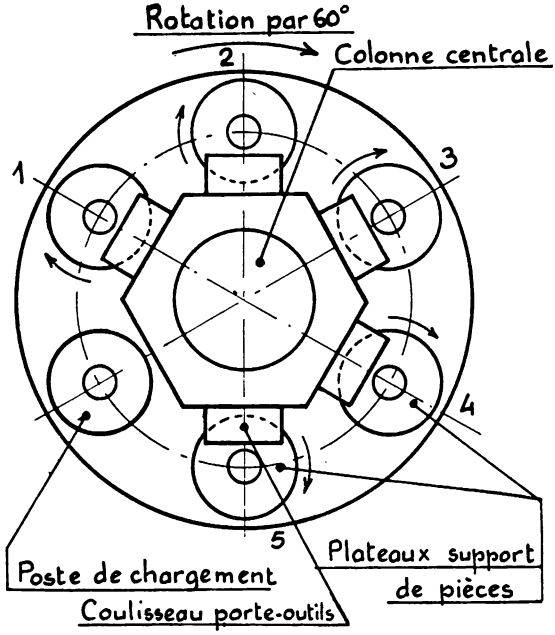


Fig. 69. — Tour à 6 plateaux horizontaux (vue de dessus).

TOURNAGE PAR REPRODUCTION

Tours à reproduire ou à copier.

Problème à résoudre.

Pour obtenir une pièce de révolution à génératrice curviligne, on peut choisir entre deux techniques :

a) tournage avec outil de forme (*fig.* 70),

b) tournage avec outil d'enveloppe.

Dans le premier cas, l'outil doit être à profil constant pour qu'il puisse conserver sa forme après réaffûtage ; c'est donc un outil cher et de durée relativement brève. Il faut le réaffûter souvent, car l'usure le long de son tranchant varie avec les diamètres d_1, d_2, d_3. Pour réduire l'usure, on choisit une vitesse de coupe aussi voisine que possible de la vitesse de moindre usure pour le plus grand diamètre, ce qui ralentit beaucoup la production.

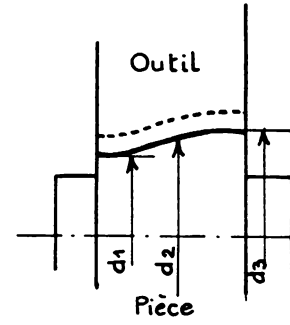


Fig. 70. — Travail à l'outil de forme.

Dans le second cas, on utilise l'outil rond symétrique ou l'outil à charioter montés sur des tours à reproduire dont le chariot porte-outil est animé non seulement du mouvement d'avance parallèle à l'axe de la pièce, mais également d'un autre déplacement perpendiculaire à l'axe. Ce dernier déplacement est assuré par le contact d'une pièce solidaire du chariot (galet par exemple) avec un gabarit.

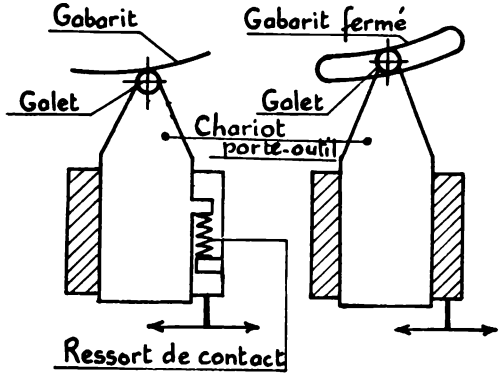


Fig. 71. — Schéma de principe du déplacement du chariot porte-outil d'un tour à reproduire.

Le contact de ces deux pièces (galet et gabarit) est assuré par l'action de ressorts ou par guidage dans un gabarit fermé (*fig.* 71). Il faut, pour que le déplacement du chariot soit possible, que la pente du calibre ne produise en aucun point l'arc-boutement (*fig.* 72).

Des machines à reproduire (tour et fraiseuse) fondées sur ce principe ont été réalisées. Mais elles ne sont pas parfaites, et leurs possibilités sont limitées. Les constructeurs

ont donc été amenés à améliorer la commande du chariot porte-outil : à l'action directe du gabarit sur le chariot a été substitué un dispositif hydraulique (ou électro-mécanique) commandé par un palpeur en contact avec le gabarit. Ce dispositif est lié au chariot porte-outil qu'il entraîne (*fig.* 73).

Tours et appareils à reproduire

Il existe des tours conçus spécialement pour exécuter des séries de pièces en utilisant le principe de la reproduction ; ils sont désignés sous le nom de tours à copier.

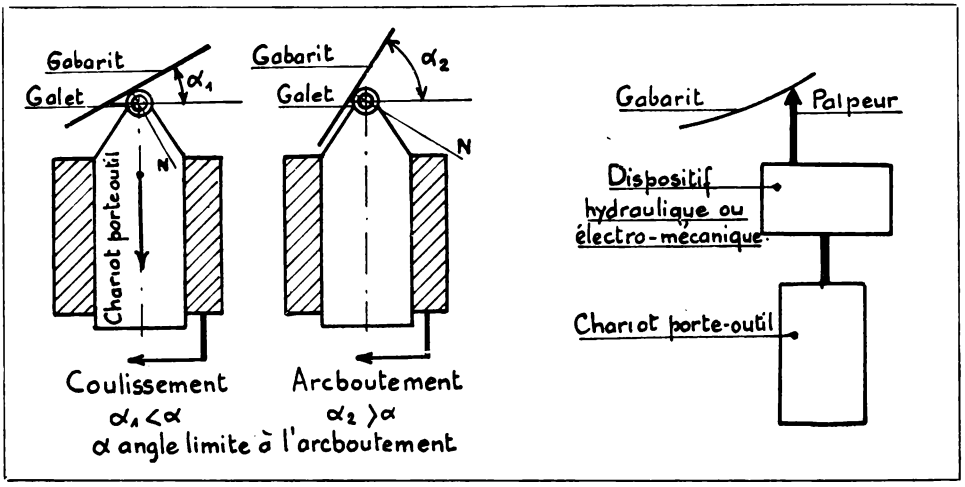


Fig. 72. — Conditions pour que le coulissement du chariot porte-outil soit possible.

Fig. 73. — Schéma de principe de la reproduction par dispositif hydraulique ou électro-mécanique.

On construit également des appareils à copier qui s'adaptent aux tours parallèles classiques. On peut ainsi, sur le même tour, conduire des travaux d'outillage et réaliser des pièces de forme en série.

CAZENEUVE, ERNAULT, SOMUA, en France, sont les principaux constructeurs de tours ou d'appareils à copier.

Principe d'un dispositif de reproduction.

Afin de fixer les idées, nous décrirons le dispositif à copier, conçu par la Société Ernault-Batignolles-Châtillon et qui équipe son tour dit OP320. Le gabarit utilisé est taillé dans de la tôle, ou bien c'est une pièce tournée et même, rectifiée ; dans ce dernier cas, on le monte entrepointes, à l'arrière du tour, son axe étant parallèle à celui de la broche. Le traînard est entraîné par une barre de chariotage, et le chariot porte-outil est à commande hydraulique (*fig.* 74). L'huile est le fluide moteur ; elle est mise en pression par une pompe qui la refoule dans un cylindre où se meut un piston lié directement au chariot porte-outil par l'intermédiaire d'une vis de réglage.

Les déplacements du palpeur résultent des variations de rayon (ou d'ordonnées) du calibre ; ils provoquent l'ouverture ou la fermeture de la soupape.
Quand la soupape est fermée il y a action de l'huile, à même pression unitaire (celle

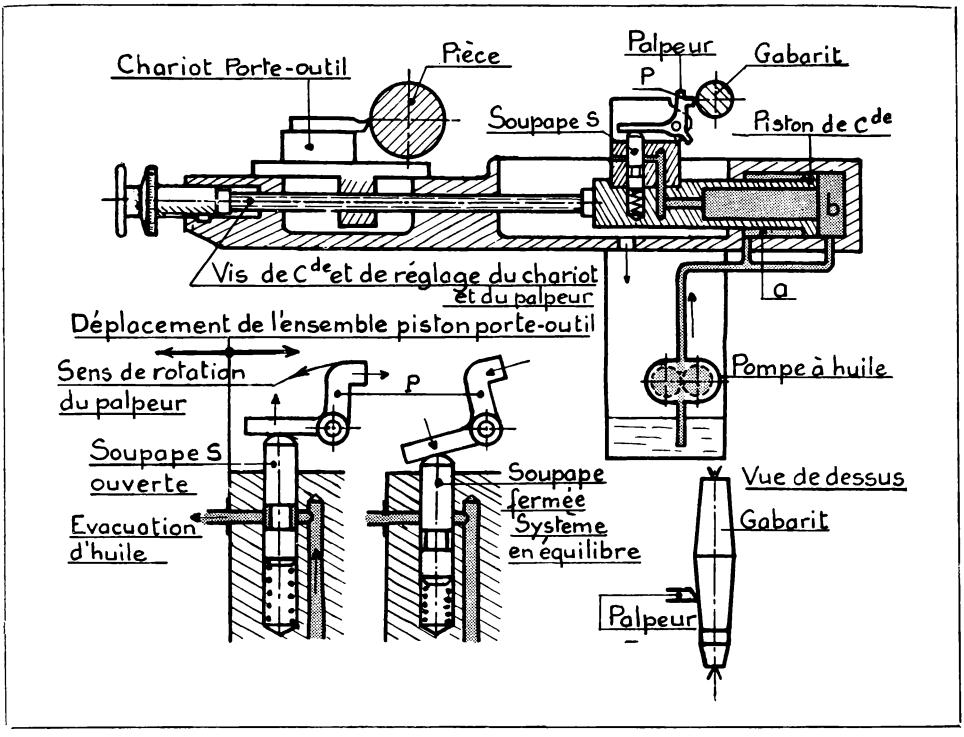


Fig. 74. — Principe du reproducteur Ernault-Batignolles (1).

fournie par la pompe) sur la grande face du piston et sur sa face annulaire beaucoup plus petite. Le piston et le chariot vont donc se déplacer vers la gauche ce qui fait tourner le palpeur P autour de son axe vers la droite ; la soupape S monte et découvre une fuite qui fait baisser la pression en *b* ; le piston se déplace vers la droite, c'est-à-dire dans le même sens que le palpeur. Ce déplacement a pour effet de provoquer la rotation du palpeur dans le sens trigonométrique ; la soupape se referme. L'équilibre s'établit ainsi pour une nouvelle position de l'outil. L'action du gabarit provoquera une nouvelle ouverture de la soupape et l'outil se déplacera à nouveau. Le déplacement du palpeur est donc continu et celui de l'outil l'est aussi. Ce système ne permet que l'exécution de profils comportant des angles inférieurs ou au plus égaux à 120°. Pour l'exécution des épaulements à angle droit, il a fallu compléter le dispositif par un appareil électrique qui comprend :

a) un organe détecteur : palpeur et contacteur,

b) des organes moteurs : électro-aimants.

(1) Nous engageons les professeurs à exécuter un matériel de démonstration pour faire comprendre aux élèves ce dispositif.

La *figure* 75 donne le schéma du dispositif. Le palpeur peut tourner autour de deux axes : l'un vertical OO', l'autre horizontal *xx'*. Le débrayage de la barre de chariotage est assuré par un électro-aimant à axe horizontal ; un deuxième électro-aimant à axe vertical provoque la rotation du palpeur autour de l'axe horizontal *xx'*, et permet l'ouverture de la soupape du chariot porte-outil.

On constate :

Position 1. — Le palpeur rencontre l'épaulement ;

Position 2. — Le chariot poursuivant son avance, le palpeur tourne autour de l'axe vertical OO' : le contact électrique 1 est coupé ; l'électro-aimant horizontal E_1 n'étant

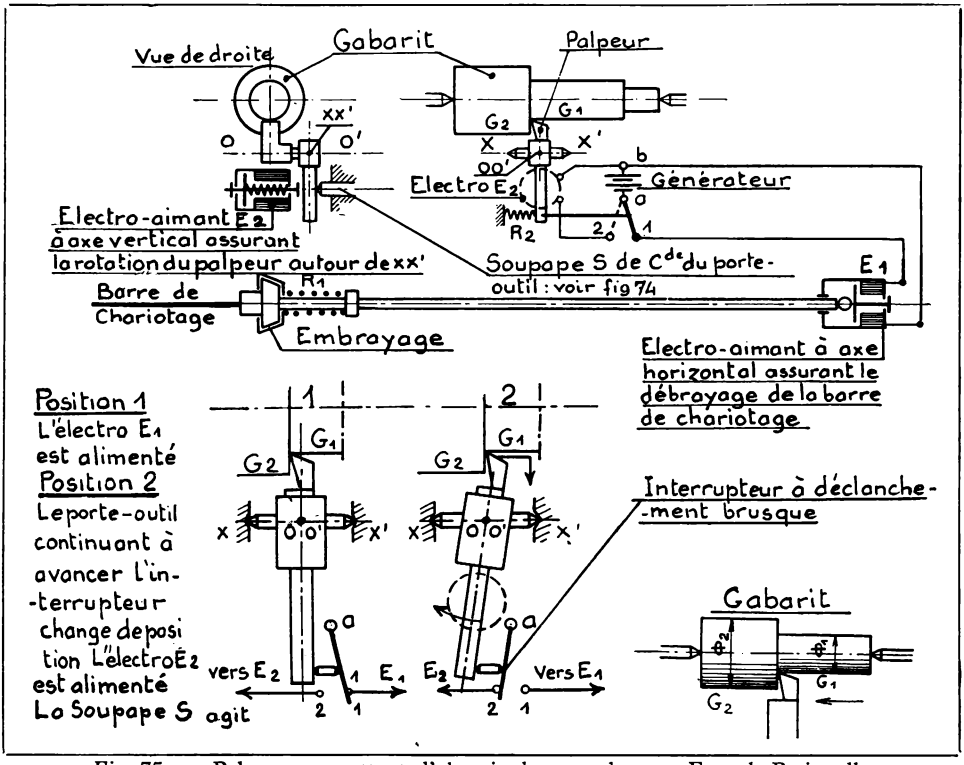


Fig. 75. — Palpeur permettant d'obtenir du reproducteur Ernault-Batignolles l'usinage d'épaulements droits.

plus excité, la barre de chariotage se débraye sous l'action du ressort R_1 et le traînard s'immobilise.

Le contact électrique 2 s'établit ensuite et l'électro-aimant vertical E_2 est alimenté ; la palette située sur la face gauche de l'électro-aimant est attirée ; son axe pousse le palpeur qui tourne autour de *xx'* dans le sens trigonométrique ; la soupape S (*fig.* 74) se ferme. Le mouvement de recul se produit jusqu'à ce que, la génératrice G_2 étant atteinte, le ressort R_2 rappelle le palpeur qui rétablit le contact 1. L'électro-aimant vertical est coupé tandis que l'horizontal, excité, embraye la barre de chariotage, et le cylindrage se poursuit.

Travaux réalisés au tour à copier.

Le tour à copier simple utilise un seul outil ; la forme à donner à l'outil est fonction :

— du profil à exécuter,

— des angles de coupe à respecter,

— des efforts de coupe à équilibrer,

— du débit de copeau à obtenir.

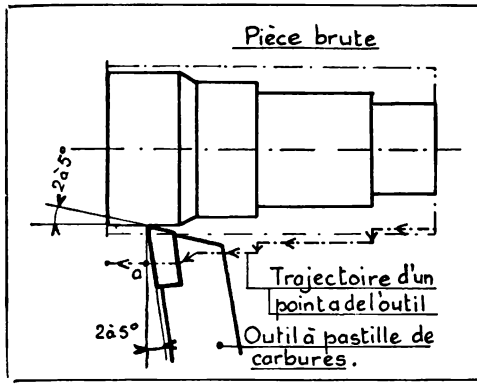


Fig. 76. — Usinage d'un profil ascendant.

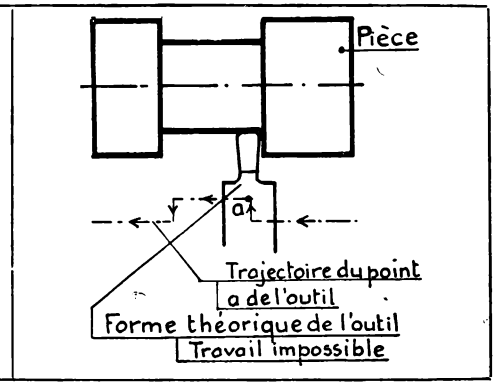


Fig. 77. — Pièce présentant deux épaulements droits opposés : impossible à exécuter avec un seul outil.

On n'utilise évidemment que des outils à plaquette de carbure rapportée ; ils ont le maximum de durée et assurent le meilleur rendement. La partie active de l'outil doit être aussi massive que possible afin qu'elle puisse résister aux efforts de coupe (assise suffisante) en assurant l'évacuation rapide des calories produites. Tout profil ascendant de la pièce (*fig.* 76) permet de donner à l'outil sa meilleure forme. Par contre, une pièce présentant deux épaulements droits opposés est pratiquement irréalisable par copie à l'outil unique. Celui-ci devrait avoir la forme d'un outil à saigner et devrait être capable de charioter (*fig.* 77). Son rendement serait très faible car il ne pourrait tailler que des copeaux très minces.

L'exécution de deux surfaces tronconiques ou de deux chanfreins de sens contraires exige un outil d'angle de pointe inférieur à l'angle formé par les génératrices des cônes (*fig.* 78). Il est donc souhaitable, si l'on désire un outil très résistant, de prévoir des cônes dont le demi-angle au sommet ait une valeur minimum de 45°.

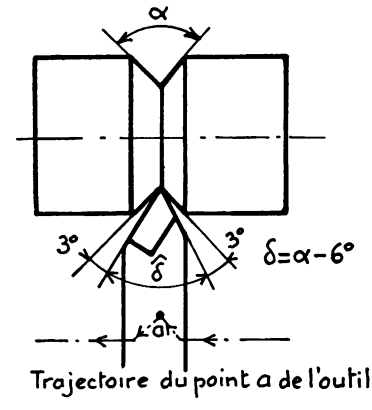


Fig. 78. — Forme de l'outil pour usinage de deux surfaces tronconiques opposées.

De même, on recherchera pour exécuter des congés de raccordement ou des gorges de dégagement de rectification, des formes qui assurent à l'outil l'angle de pointe maximum (*fig.* 79).

Le trajet de l'outil ne peut pas non plus être absolument quelconque ; il faut toujours rechercher celui qui évite d'avoir un copeau de trop grandes dimensions. Sur la *figure* 80 on voit que le trajet 1 impose en *a* un copeau très large ; le trajet 2 est préférable.

Une trop grande différence de diamètre, un excès de métal à enlever, un profil avec trop de pénétration, constituent des difficultés de réalisation avec un outil unique (*fig.* 81).

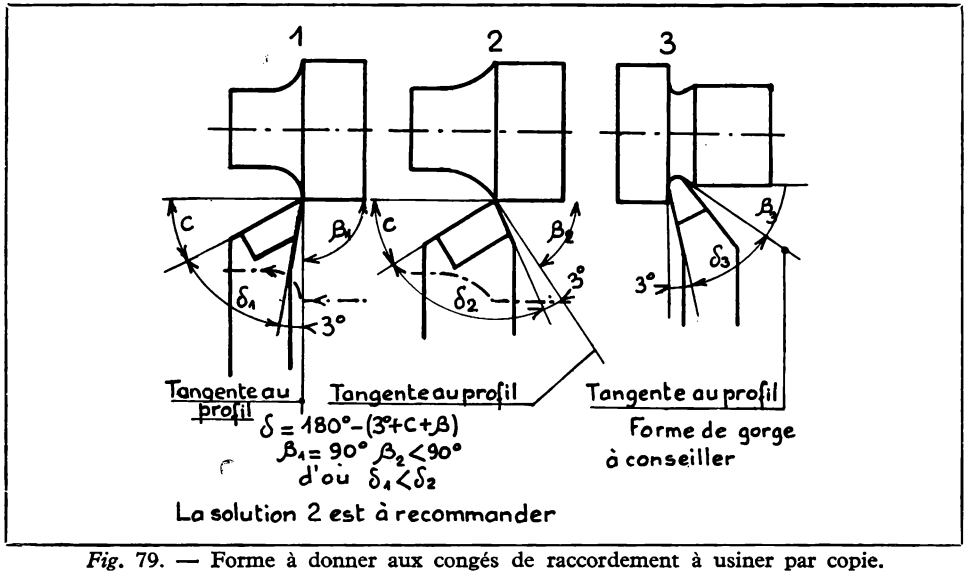


Fig. 79. — Forme à donner aux congés de raccordement à usiner par copie.

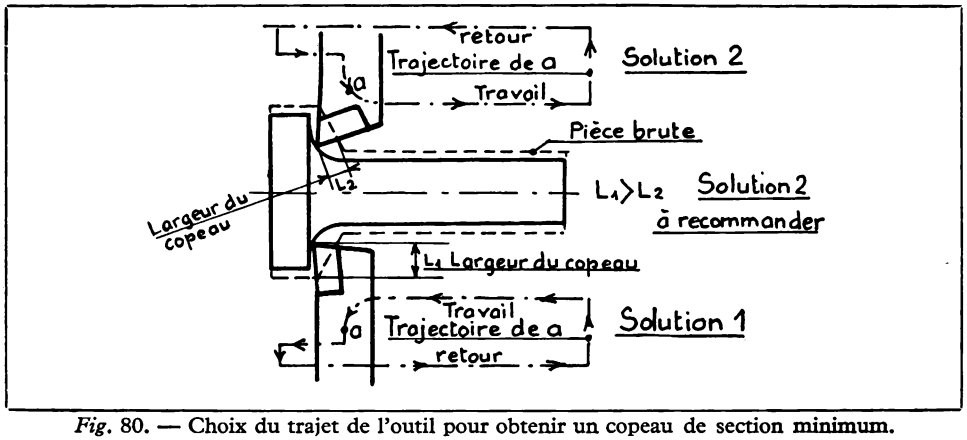


Fig. 80. — Choix du trajet de l'outil pour obtenir un copeau de section minimum.

Il faut donc donner aux pièces devant être usinées par copie des formes qui tiennent compte des exigences de ce mode d'usinage.

Les machines.

a) *Augmentation du rendement.*

Nous venons de voir qu'il est souvent difficile de donner à l'outil à copier une résistance suffisante pour assurer un bon rendement. On a donc été conduit à concevoir des machines permettant de réaliser, sans démontage de la pièce, plusieurs opérations : ébauche, demi-finition, finition. Pour ne pas être obligé de changer de gabarit après chaque opération, le tour a été muni d'une tourelle-revolver qui en reçoit plusieurs (*fig.* 82). En outre, pour qu'on puisse exécuter des pièces à profils pénétrants ou comportant beaucoup de matière à enlever, on a prévu l'emploi de plusieurs outils. Ainsi le tour comporte : le chariot à copier, dont l'outil exécutera le profil ascendant, et des chariots radiaux, commandés hydrauliquement, manuellement ou automatiquement, dont les outils plongent (fonçage) dans le métal pour former les gorges ou enlever le métal excédentaire (*fig.* 83).

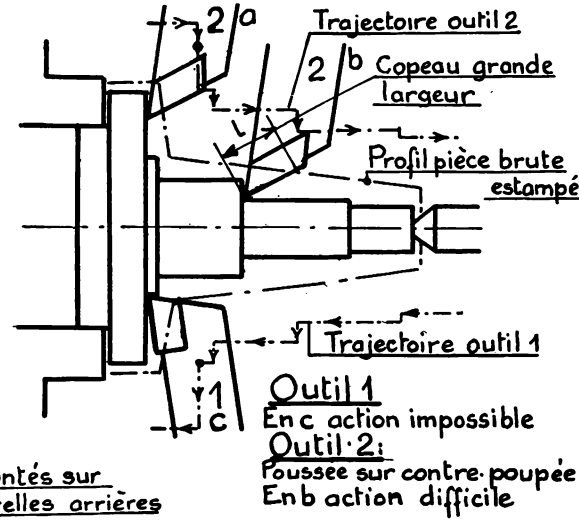


Fig. 81. — Difficultés rencontrées pour l'usinage de pièces ayant des diamètres très différents.

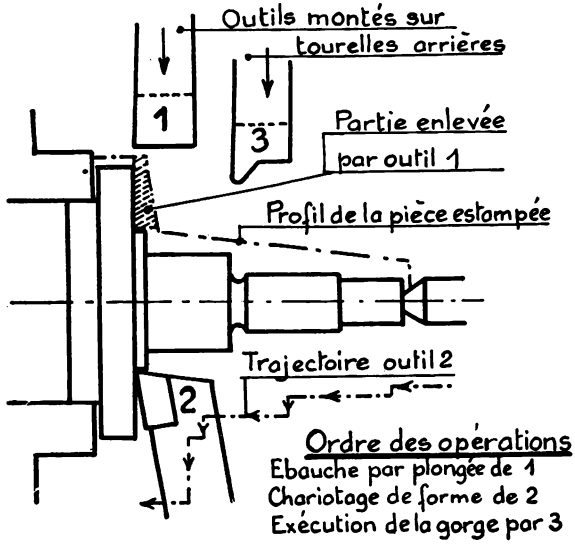


Fig. 83. — Utilisation combinée des outils montés sur tourelle arrière et de l'outil à copier.

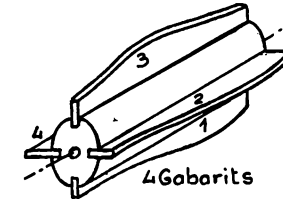


Fig. 82. — Gabarits montés sur tourelle.

b) *Augmentation des possibilités.*

Travail au gabarit tournant.

Si on remplace le gabarit fixe par un gabarit tournant à la même vitesse que la broche, la pièce tournée aura la même forme que le gabarit. On peut ainsi obtenir des pièces de section polygonale ou elliptique ; on peut même reproduire des lettres en relief ou en creux (*fig.* 84).

Le procédé permet la production de pièces creuses de forme quelconque à partir de

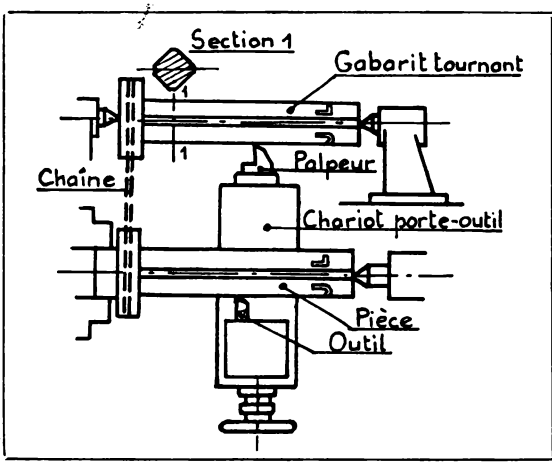


Fig. 84. — Exécution par copiage au gabarit tournant de pièces de forme extérieure quelconque.

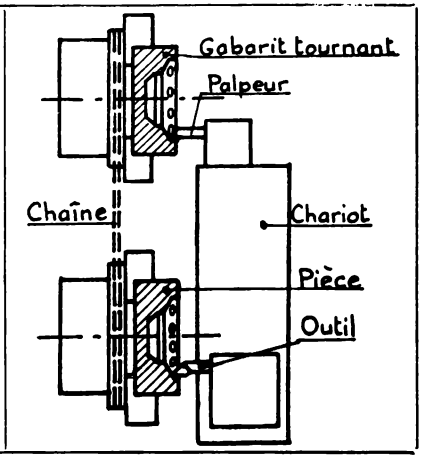


Fig. 85. — Exécution par copiage au gabarit tournant de pièces de forme intérieure quelconque.

modèles en creux ou en relief ; cette possibilité est très appréciée des constructeurs de matrices et de moules métalliques (*fig.* 85).

c) *Les machines.*

Il existe des appareils à copier adaptables aux tours ordinaires ; les possibilités de travail sont celles de l'outil unique.

Il existe aussi des machines spécialement étudiées pour la copie, dont le cycle d'usinage est automatique. L'avance du chariot longitudinal est hydraulique, et ses déplacements sont contrôlés par une vis-mère. Ils possèdent un double dispositif à copier pour la réalisation d'épaulements droits opposés, des chariots radiaux pour le travail en plongée, et un porte-gabarit revolver (tournant). On peut, en outre, adapter à ces machines un variateur de vitesse à commande électronique, qui permet de maintenir constante la vitesse de coupe en dépit des variations de diamètres de la pièce. Tel est le tour Pilote créé et construit par Ernault-Batignolles à Paris.

Applications.

Le tour à copier est, par excellence, la machine propre à produire des solides de révolution à génératrice courbe. Il concurrence le tour semi-automatique pour les séries moyennes et le tour automatique pour les grandes séries.

CHOIX DU TOUR LE MIEUX ADAPTÉ A UN TRAVAIL DONNÉ

Si un atelier possède différents tours, et si l'on imagine qu'ils soient tous disponibles, le choix est uniquement guidé par des considérations de prix de revient.

Pour chaque type de tour, on étudie les temps d'usinage, de préparation et de réglage, et les prix des outillages spéciaux. Le choix de la machine dépend du nombre de pièces à usiner.

Etudions sur un cas concret, comment on peut conduire le calcul.

Soit à usiner n pièces ; on a le choix entre le tour semi-automatique à tourelle revolver le tour automatique et le tour à copier.

Etablissons le bilan du prix de revient de l'usinage. Ce prix comprend :

a) *Dépenses d'équipement :* E.

Coût de la main-d'œuvre de l'ouvrier-régleur : r,

prix de revient de l'outillage spécial : p,

on a $E = r + p$;

b) *Dépenses horaires relatives à l'usinage :* U.

frais horaires relatifs à la machine (amortissement machines et outils, entretien, courant électrique, huile de coupe et de graissage) : f,
main-d'œuvre horaire (ouvrier conducteur de la machine) : s (charges sociales comprises),

on a $U = f + s$.

Si t est le temps nécessaire à l'exécution d'une pièce, le prix de revient de l'usinage pour n pièces est :

$$P = E + Utn$$

Calculons P pour chacune des machines possibles. On prendra comme prix horaire de la main-d'œuvre les valeurs suivantes (1) :

Régleur : salaire 3 F par heure + 50 % charges sociales = 4,50 F/h

Ouvrier : salaire 2,50 F par heure + 50 % charges sociales = 3,75 F/h

Manœuvre : salaire 2 F par heure + 50 % charges sociales = 3 F/h.

Tour semi-automatique.

Dépenses d'équipement :

Réglage : 2 heures, soit $r = 2 \times 4{,}50 = 9$ F

Outillage spécial : $p = 10$ F

$$E = 10 + 6 = 16 \text{ F}$$

(1) Les salaires sont ceux de 1955 traduits en nouveaux francs.

Dépenses horaires d'usinage :

Frais horaire : $f = 4$ F/h

Main-d'œuvre : 1 ouvrier par machine ; $s = 3{,}75$ F/h

$$U = 4 + 3{,}75 = 7{,}75 \text{ F}$$

Prix de revient pour n *pièces :*

Temps d'usinage pour une pièce : 6 mn $= \frac{1}{10}$ d'heure.

$$P_1 = 19 + 7{,}75 \frac{1}{10} n = 19 + 0{,}775 n \qquad (1)$$

b) *Tour automatique.*

Dépenses d'équipement :

Réglage : 4 h, soit $r = 4 \times 4{,}50 = 18$ F

Outillage spécial : $p = 200$ F

$$E = 18 + 200 = 218 \text{ F}$$

Dépenses horaires d'usinage :

Frais horaire : $f = 5$ F/h

Main-d'œuvre : 1 manœuvre conduit 2 tours, donc :

$$s = \frac{3}{2} = 1{,}50 \text{ F}$$

Prix de revient pour n *pièces :*

Temps d'usinage pour une pièce : $3' = \frac{1}{20}$ heure

$$P_2 = 218 + 1{,}50 \frac{1}{20} n = 218 + 0{,}075 n \qquad (2)$$

L'examen des équations (1) et (2) montre que, si n est petit,

$$P_1 < P_2$$

On doit donc choisir le tour semi-automatique.

Au contraire, si n est grand, $P_1 > P_2$, le tour automatique s'impose.

La limite d'utilisation de l'une ou de l'autre machine est donnée par la relation $P_1 = P_2$ ou :

$$19 + 0{,}775 n = 218 + 0{,}075 n, \qquad \text{d'où} \qquad n = 284$$

Si le nombre de pièces à usiner est inférieur à 284, on choisira le tour semi-automatique, s'il est supérieur, le tour automatique.

TOURS VERTICAUX

La mise en position d'usinage des pièces lourdes et de grand diamètre sur le plateau d'un tour à broche horizontale est une opération difficile, longue et, parfois, dangereuse. D'autre part les masses importantes de l'ensemble plateau-pièce agissant en porte à faux produisent la surcharge du palier A et la flexion de la broche (voir *fig.* 86) : la précision d'usinage en est affectée.

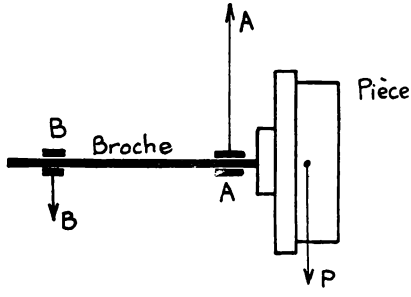


Fig. 86. — Efforts résultant d'une pièce lourde montée sur tour à broche horizontale.

Ces inconvénients disparaissent avec un plateau porte-pièce horizontal qui supporte directement à l'action de la pesanteur due aux pièces qu'il supporte.

L'axe de rotation du plateau devient vertical et la machine est appelée : tour vertical.

Le support de pièce.

Le support de pièce est un plateau en fonte avec rainures en T qui permettent de brider les pièces ; son diamètre est la caractéristique de définition des tours verticaux ; il varie de 0,800 à 20 mètres.

Le plateau repose sur le bâti par une ou plusieurs couronnes de façon que la pression de contact soit faible pour permettre une bonne lubrification (*fig.* 87).

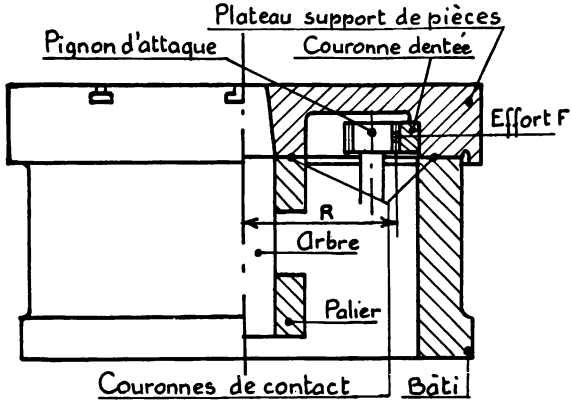


Fig. 87. — Montage du plateau d'un tour vertical.

Le guidage en rotation est assuré par un arbre vertical. L'entraînement s'effectue sous l'action directe du pignon de commande attaquant une couronne dentée de grand diamètre montée sur le plateau (*fig.* 87). Cette disposition élimine toute déformation de torsion de la broche ; les actions sur les paliers de l'arbre vertical dues à l'effort tangentiel sont faibles puisque le diamètre D de la couronne dentée est grand (couple moteur $C = \frac{F \times D}{2}$, donc F est petit).

Porte-outils.

Les tours verticaux sont conçus pour réaliser des usinages à grand rendement. Ils comportent :

— plusieurs outils montés sur différents chariots qui peuvent les amener en action en même temps,

— des tourelles porte-outils qui peuvent recevoir 4, 5 ou 6 outils amenés successivement en position de travail par la rotation de ces tourelles.

Les différents chariots porte-outils peuvent se déplacer automatiquement suivant

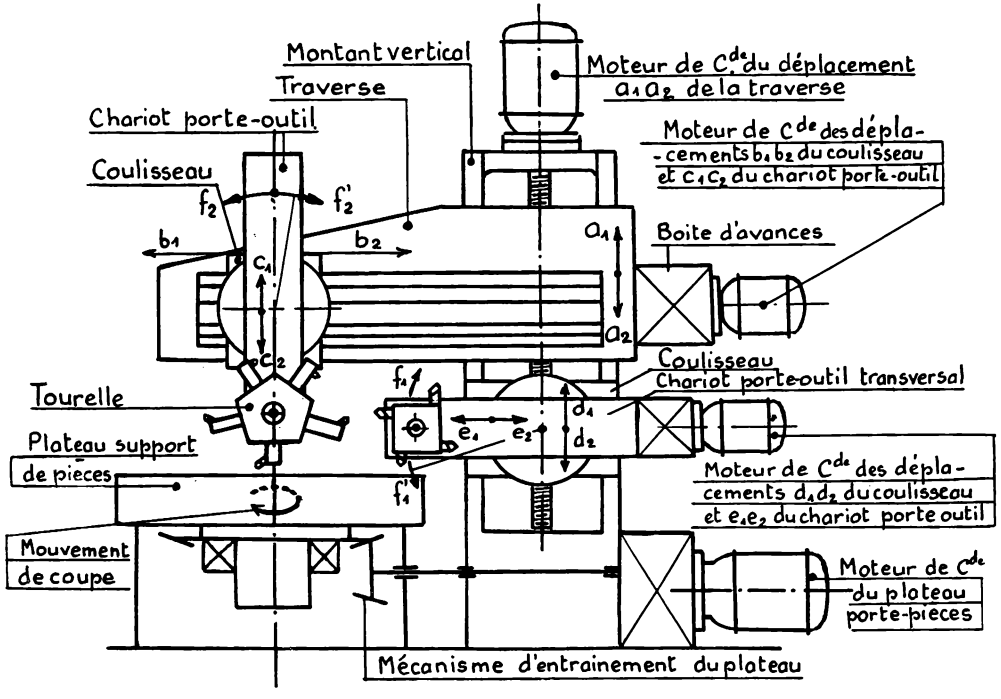


Fig. 88. — Tour vertical à un seul montant.

des directions obliques par rapport à l'axe de rotation du porte-pièce (exécution des surfaces coniques).

Un ou plusieurs chariots porte-outils permettent l'exécution de filetages.

Le déplacement des différents chariots lent en période de travail est souvent accéléré pour amener les outils en approche pour les réglages et pour les reculer.

La *figure* 88 représente un tour vertical de petite dimension à un seul montant vertical sur lequel se déplacent :

a) un chariot porte-outil latéral.

La tourelle porte-outil se déplace sur les glissières orientées normalement dans le

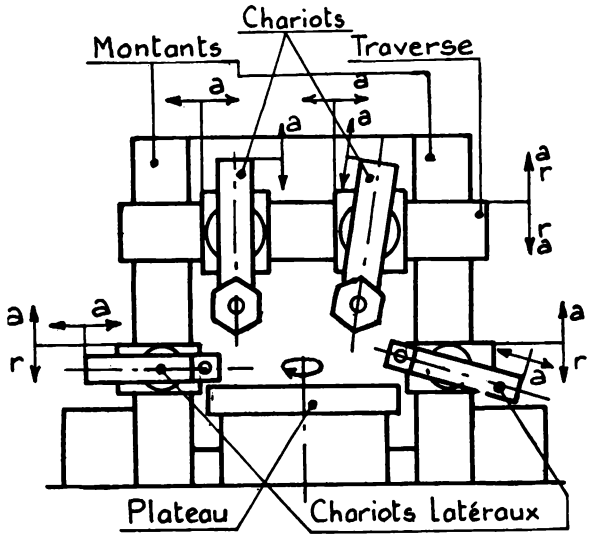


Fig. 89. — Tour vertical à deux montants.

plan horizontal. Mais pour exécuter des cônes on peut incliner les glissières par rotation dans le sens f_1 ou f'_1.

b) une traverse horizontale sur laquelle se déplace un chariot analogue au traînard du tour parallèle : ce chariot reçoit un porte-outil à tourelle pentagonale ou hexagonale dont les glissières permettent des déplacements verticaux ou obliques par pivotement suivant f_2 ou f'_2.

Sur les tours verticaux de grandes dimensions, la traverse horizontale reçoit deux porte-outils ; elle est soutenue par deux montants verticaux (analogie avec une machine à raboter).

Deux autres porte-outils latéraux se déplacent sur ces montants. On dispose donc de quatre porte-outils à commandes indépendantes (*fig.* 89).

TOURS VERTICAUX SPÉCIAUX

Il existe également des tours verticaux multiples (*fig.* 90) qui permettent d'usiner simultanément plusieurs pièces identiques. On les emploie surtout dans l'industrie de l'automobile.

Si, par exemple, l'usinage sur une face peut être décomposé en 5 opérations on

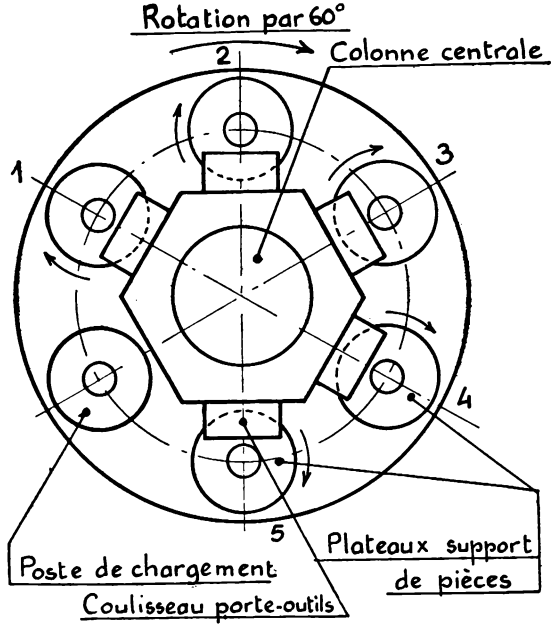


Fig. 90. — Tours verticaux multiples.

pourra utiliser un tour vertical à 6 plateaux. Ces plateaux passent successivement devant 5 groupes d'outils, chaque groupe correspondant à *une* opération. Quand l'axe d'un plateau porte-pièce a fait un tour complet autour de l'axe de la machine la pièce est terminée. Le sixième poste ne comporte pas d'outils : c'est à ce poste que le conducteur du tour retire les pièces finies et place celles à usiner.

TRAVAUX RÉALISÉS

La *figure* 91 illustre les possibilités des tours verticaux et les méthodes de travail.

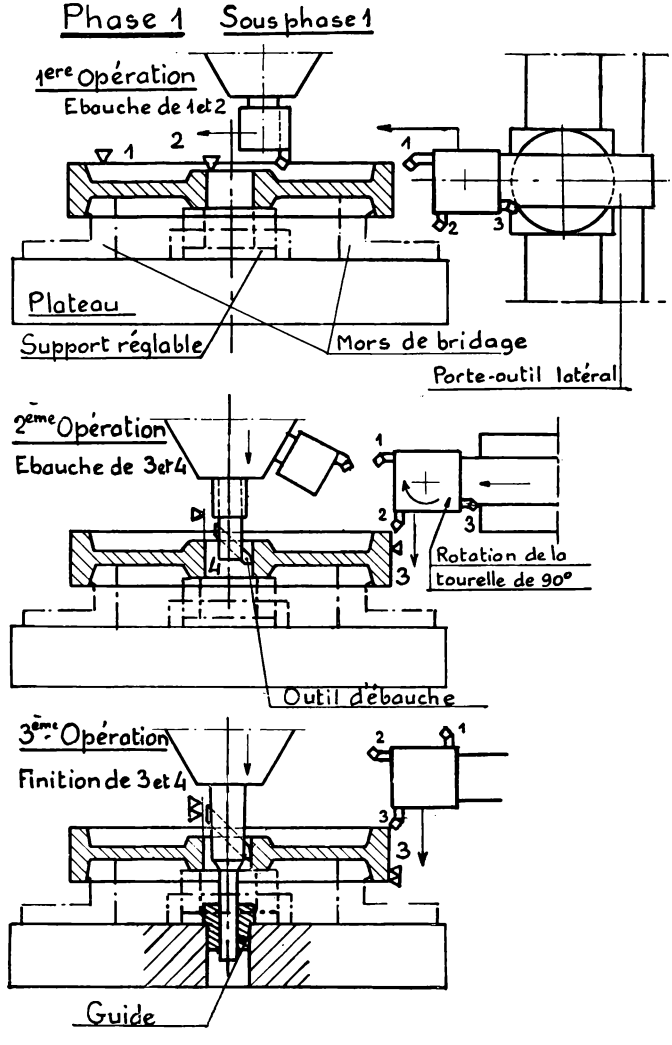


Fig. 91. — Travaux réalisés sur tour vertical.

Usinage par abrasion

L'outil est constitué par une multitude de grains abrasifs réunis par un agglomérant.

La technique de l'usinage par abrasion comprend :

a) le meulage : rectification, affûtage, ébarbage,

b) le rodage et la superfinition,

c) le polissage.

Rectification.

A l'origine, la rectification avait pour but de corriger les déformations produites par les traitements thermiques appliqués aux pièces usinées près de leurs cotes finales. Comme aucun outil métallique ne peut attaquer les pièces trempées, on a songé à utiliser la meule. Le champ d'application de l'outil-meule s'est naturellement élargi en raison de la nécessité d'obtenir ;

— une précision sans cesse accrue : qualité d'usinage 7 et 6 pour les fabrications sérielles, et 5 pour les outillages spéciaux.

— un meilleur état de surface pour les parties frottantes et certains instruments de vérification.

On rectifie :

— des surfaces cylindriques et coniques extérieures et intérieures,

— des surfaces de révolution à génératrice non rectiligne,

— des surfaces planes,

— des surfaces réglées à directrice curviligne,

— des surfaces hélicoïdales.

L'étude de l'outil et de son mode d'action est faite en fin de ce chapitre.

1. — RECTIFICATION

RECTIFICATION DE SURFACES CYLINDRIQUES EXTÉRIEURES

A. — Rectification extérieure avec pièce montée entre pointes ou en l'air

1° Principe de réalisation du cylindre et du cône.

a) *Les mouvements de coupe.*

La meule cylindrique est animée d'un mouvement de rotation rapide suivant f (*fig.* 1). La pièce est animée d'un mouvement lent de rotation suivant f', de même sens

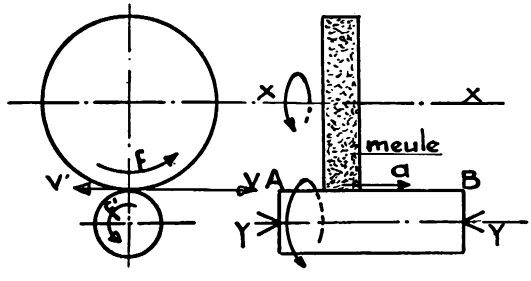


Fig. 1. — Rectification cylindrique extérieure.

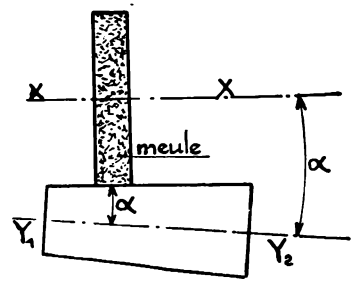


Fig. 2 — Rectification conique extérieure.

que celui de la meule : ainsi, dans la zone de contact, les vecteurs vitesse de la meule V, et de la pièce : V′, sont en opposition. A l'action d'un grain d'abrasif, la pièce oppose l'action du métal, et la formation du copeau est ainsi parfaitement assurée (*fig.* 3).

La vitesse de coupe est le vecteur résultant : $V_c = V + V'$. Mais la vitesse de la meule V est grande (environ 1 800 m/mn) par rapport à celle de la pièce V′ (environ 15 m/mn), soit $V' = \frac{V}{120}$.

Aussi, pour simplifier, on ne considère, dans les calculs, que la vitesse de la meule.

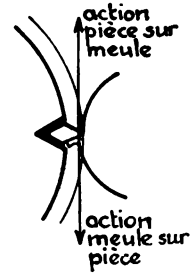


Fig. 3. — Efforts sur un grain d'abrasif.

b) *Mouvement d'avance.*

Un mouvement de translation de la meule par rapport à la pièce, suivant la génératrice

AB, est indispensable pour réaliser les pièces longues. C'est le mouvement d'avance on peut le donner à la pièce ou à la meule.

La meule doit parcourir la génératrice, d'abord dans un sens AB, puis dans le sens contraire BA ; la machine doit donc avoir un changement de marche à amplitude réglable. Un point pris sur l'axe de la meule doit se déplacer le long de cet axe même : la génératrice AB est donc parallèle à l'axe de rotation de la meule.

Si l'axe de la pièce *yy* est parallèle à la génératrice AB et, par conséquent, à l'axe de la meule *xx*, on produira, par rectification, un cylindre (*fig.* 1).

Si l'axe de la pièce y_1y_2 fait avec la génératrice et, par suite, avec l'axe de la meule *xx* un angle α, la surface obtenue est un tronc de cône de révolution (*fig.* 2).

c) *Travail en plongée.*

Quand la pièce est courte, on peut choisir une meule de largeur supérieure à la longueur de la pièce ; on supprime alors le mouvement d'avance parallèle à la génératrice de

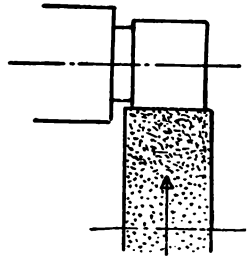


Fig 4. — Meulage cylindrique en plongée.

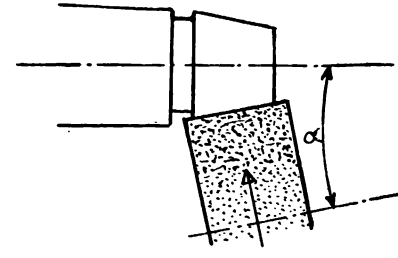


Fig. 5. — Meulage conique en plongée.

contact. La meule n'a qu'un mouvement de pénétration normal à cette génératrice. La meule travaille alors comme un outil de forme ; elle doit être parfaitement cylindrique (*fig.* 4 et 5).

2° Usinage d'une partie cylindrique contre un épaulement.

La meule plate de rectification ne doit pas tailler le métal à la fois par sa partie cylindrique et par l'une de ses faces. Si la partie cylindrique et la face plane de l'épaulement doivent être rectifiées, les usinages de ces deux surfaces doivent être séparés. Le travail est plus facile si l'on prévoit un dégagement de meule contre l'épaulement (*fig.* 6). On rectifie l'épaulement en se servant d'une meule assiette ou de la meule plate taillée comme l'indique la *figure* 7.

Mais, quand on usine la face plane, on risque l'engagement de la meule sur la surface cylindrique ; pour l'éviter, on recule la meule de 2 à 3/100 de mm avant de passer au dressage de la face.

Certains constructeurs ont prévu la rectification cylindrique par meule oblique

taillée en forme de double tronc de cône (*fig.* 8). L'axe de la meule fait avec l'axe de la pièce un angle de 10 à 30°.

Il est alors possible, avec cette meule convenablement taillée, de rectifier la partie cylindrique et la face de l'épaulement, sans faire de dégagement, mais en obtenant un

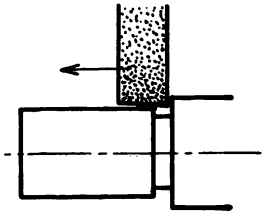


Fig. 6. — Dégagement de meule.

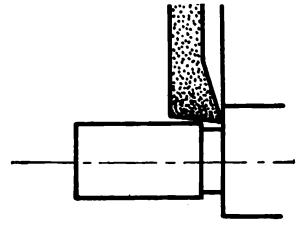


Fig. 7. — Meulage d'une face plane.

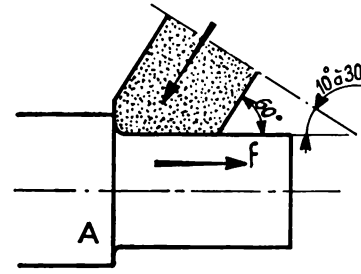


Fig. 8. — Meulage simultané sur face et cylindre.

raccord arrondi entre les deux surfaces, ce qui conserve à la pièce le maximum de résistance. On débute la passe en A, et on entraîne la meule dans le sens de la flèche *f*.

3° Le support de pièce.

La précision exigée en rectification étant très grande, le support de pièce doit être particulièrement soigné afin d'assurer une rotation de la pièce aussi parfaite que possible. La broche de la machine est montée sur des paliers à billes de haute précision, ou sur des paliers lisses exécutés avec beaucoup de soin ; ceci est indispensable pour la rectification en l'air seulement, car, en rectification entre pointes, cette broche ne sert qu'à entraîner le toc.

La pièce peut être montée, comme sur le tour :

- en l'air, sur un plateau à serrage concentrique, en mors durs ou en mors doux ;

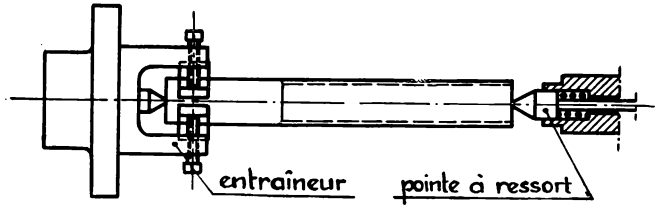


Fig. 9. — Pointe à ressort.

- entre pointes, et, dans ce cas, les centres de la pièce doivent être soignés, rectifiés et, même, rodés. Les deux pointes sont fixes sur les machines à rectifier, ce qui assure mieux l'invariabilité de leur alignement pendant le travail. La contre-poupée est munie d'une pointe élastique qui permet la libre dilatation de la pièce (*fig.* 9).

On soutient les pièces longues au moyen de lunettes judicieusement réparties.

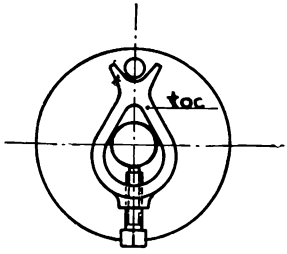


Fig. 10. — Toc pour rectification.

L'entraînement est assuré par un collier (*fig.* 11) ou par un toc (*fig.* 10) aussi bien équilibré que possible. La liaison doit être rigide (queue du toc prise entre deux vis : *fig.* 11) pour la rectification des vis en particulier.

- en mandrin expansible ou non monté en l'air, ou entre pointes (*fig.* 12).

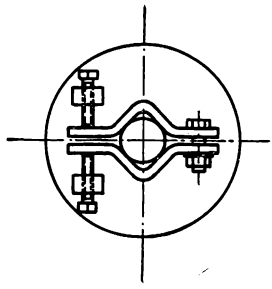


Fig. 11. — Collier pour rectification.

La concentricité de l'alésage et de la surface extérieure rectifiée sera obtenue dans les tolérances exigées si le mandrin est de la précision supérieure.

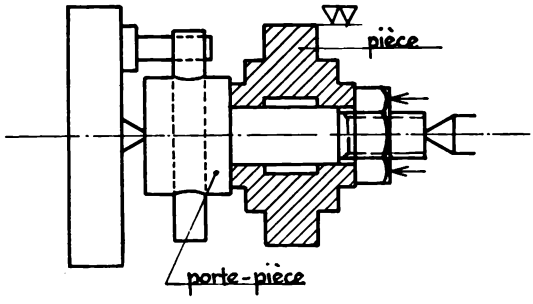


Fig. 12. — Rectification sur mandrin.

4° Les machines.

Elles comportent :

a) *un support d'outil,*

poupée porte-meule comprenant la broche porte-meule et les organes moteurs la mettant en rotation.

b) *un support de pièce,*

constitué par une poupée porte-pièce qui assure le maintien de la pièce, et les organes qui lui donnent son mouvement. Le support de pièce se complète, pour le travail entre pointes, par une contre-poupée. Poupée et contre-poupée sont montées sur une table en deux éléments superposés.

c) *les organes donnant le mouvement d'avance,*

Ce mouvement d'avance est une translation communiquée, sur certaines machines, au porte-pièce (*fig.* 15-16-17) et, sur d'autres, au porte-meule (*fig.* 13-14).

d) *un dispositif qui permet de régler la distance de la meule par rapport à la pièce.*

Généralement la poupée porte-meule est fixée sur un chariot commandé manuellement ou automatiquement (*fig.* 13 à 17).

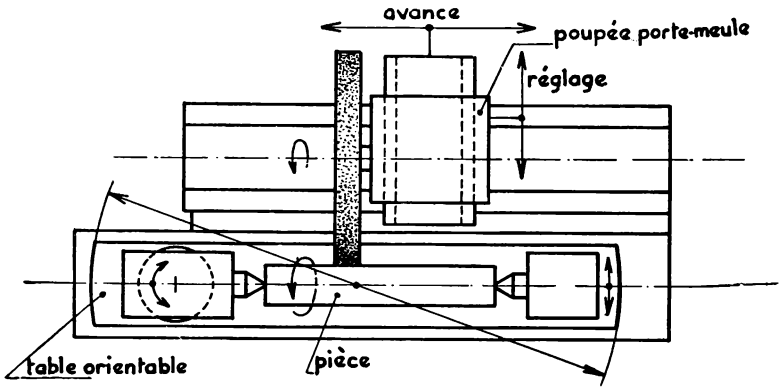


Fig. 13. — Machine à rectifier à porte-meule mobile.

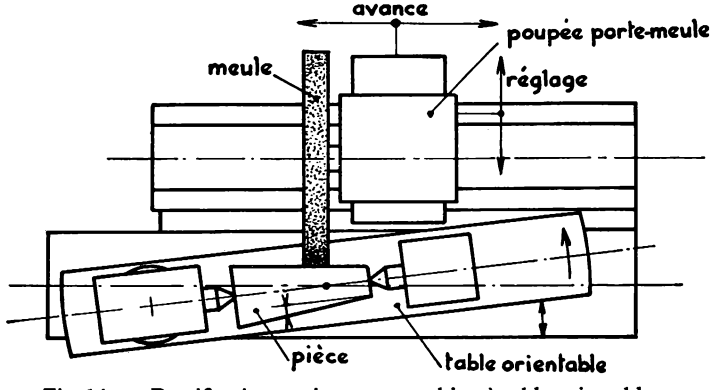


Fig. 14. — Rectification conique sur machine à table orientable.

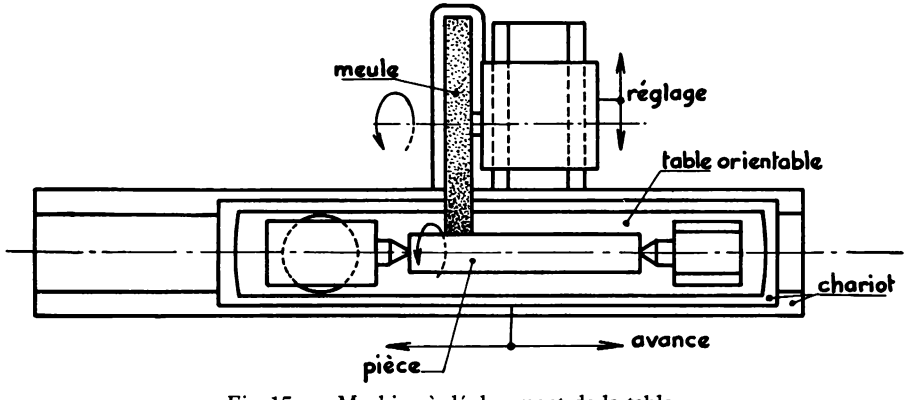


Fig. 15. — Machine à déplacement de la table.

e) *des appareils pneumatiques ou électro-mécaniques chargés de stopper la pénétration de la meule en fonction du contrôle de la cote de la pièce, assuré lui même par des appareils automatiques.*

f) *un dispositif autorisant l'orientation du chariot porte-meule par rapport à la pièce pour la rectification conique.*

Ce peut être :

● une *table pivotante* permettant de réaliser des cônes dont le demi-angle

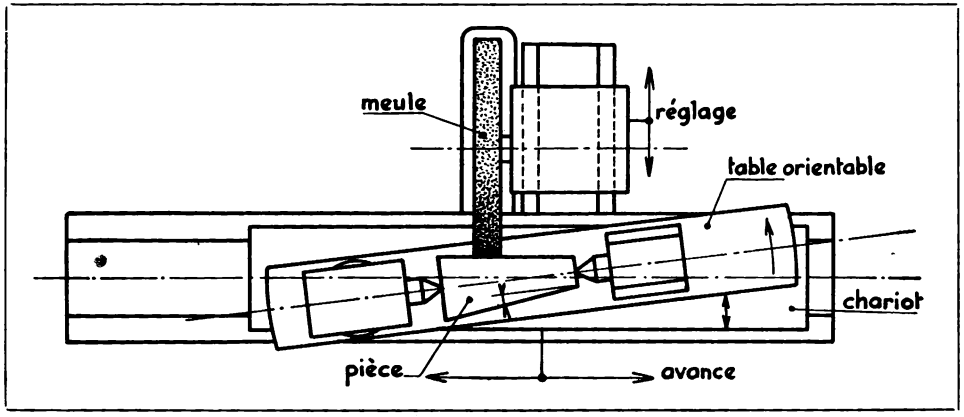


Fig. 16. — Rectification en l'air conique.

au sommet est au maximum égal à 15 ou 20° (*fig.* 13, 14, 16);

● une *poupée pivotante* porte-pièce permettant de façonner, en l'air, les cônes extérieurs de demi-angle au sommet variant de 0 à 90° (*fig.* 17).

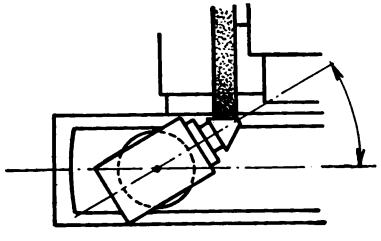


Fig. 17. — Rectification conique : déplacement de la pièce.

g) *Des organes de commande des translations* avance ou réglage, assurées mécaniquement ou hydrauliquement.

h) *Enfin, un bâti lourd rigide,* trapu, pour bien absorber les vibrations.

B. — Rectification extérieure de pièces ne possédant pas de centres (Centerless)

1° Principe.

La réalisation du cylindre nécessite comme précédemment :

a) une meule de travail tournant rapidement,

b) un dispositif assurant le maintien de la pièce en face de la meule, sa rotation et son déplacement parallèlement à la génératrice de contact.
Sur la machine à rectifier les pièces sans centres, ces trois fonctions sont assurées conjointement par une réglette-guide et une deuxième meule, dite d'entraînement.

Cette meule d'entraînement tourne dans le même sens que la meule de travail à une vitesse de 12 à 20 m/mn (*fig.* 18). La pièce tourne donc en sens inverse des meules.

Si l'axe de la meule d'entraînement est parallèle à l'axe de la meule de travail, la pièce n'a pas de translation suivant son axe : c'est le cas de la *rectification en plongée.*

Si l'axe de la meule d'entraînement est légèrement incliné par rapport à la réglette et à l'axe de la meule de travail, la pièce avance suivant son axe : c'est la *rectification à l'enfilade* (*fig.* 22).

Pour rectifier des cônes on emploie deux meules coniques à axes parallèles. La pièce

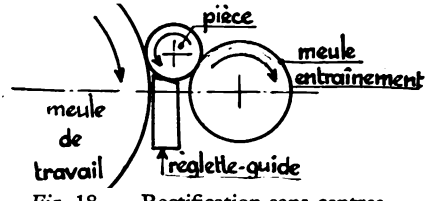


Fig. 18. — Rectification sans centres (Centerless).

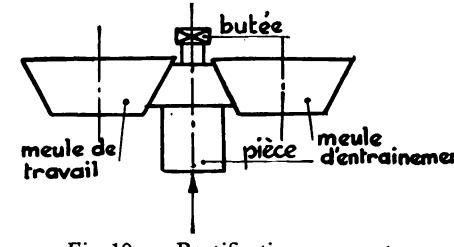


Fig. 19. — Rectification sans centres en plongée.

est poussée parallèlement à leurs axes et, quand la pièce vient au contact d'une butée, la cote est obtenue (*fig.* 19). C'est la *rectification en bout.*

Position de la pièce.

Pour obtenir une pièce de révolution, il faut placer l'axe de cette pièce au-dessus de la ligne des centres (*fig.* 20). La distance *l* varie avec le diamètre à obtenir et la nature du métal usiné. Pratiquement :

- pour les pièces de diamètre inférieur à 15 mm, leur génératrice inférieure doit être sensiblement sur la ligne joignant les centres des meules ;
- pour les pièces de diamètre supérieur à 15 mm, cette génératrice passera au-dessous de la ligne des centres à une distance comprise entre le 1/4 et le 1/5 du diamètre. La valeur de *l* dépasse rarement 10 mm.

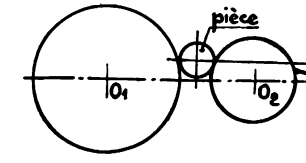


Fig. 20. — Réglage de la pièce sur Centerless.

2° Les différents éléments d'une machine à rectifier sans centre.

a) *Meule de travail.*

Elle tourne à la vitesse de coupe : 30 à 35 m/s. On la dresse avec un diamant porté par un chariot bien guidé ; la génératrice obtenue est une droite ou une courbe donnée (copie d'un gabarit).

b) *Meule d'entraînement.*

Elle est très dure et constituée de manière à entraîner la pièce sans en couper le métal ; elle est en caoutchouc vulcanisé garni de grains d'abrasif.

c) *Réglette-guide.*

La réglette-guide a pour but :

— de situer la pièce entre les deux meules,

— de la supporter pendant le travail,

— de la maintenir en contact avec la meule d'entraînement. Pour cela, elle est taillée en biseau, à 60° généralement.

L'action de la réglette résulte du poids de la pièce et de l'action des meules de travail

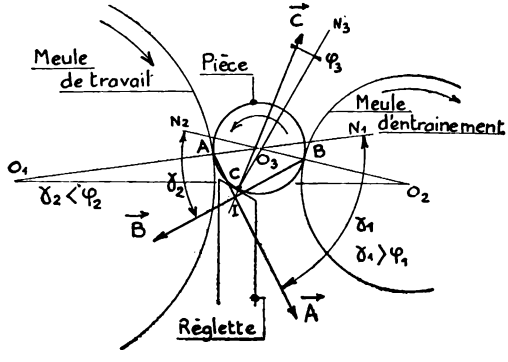


Fig. 21. — Équilibre de la pièce en rectification sans centres.

et d'entraînement sur la pièce. Il y a frottement de la pièce sur la réglette et, pour en réduire l'usure, on la réalise en métal plus dur que celui des pièces à rectifier :

— stellite ou carbure métallique, pour les pièces en acier traité ;

— acier à coupe rapide, pour les pièces de petit diamètre en métaux non ferreux ;

— fonte grise ou alliée, pour les métaux tendres, l'usinage de l'acier doux et des barres de grande longueur.

La longueur de la réglette-guide est celle des meules.

3° Étude de l'entraînement de la pièce en rotation.

La pièce est sollicitée par la meule d'entraînement et par la meule de travail dans le même sens de rotation. On pourrait penser que la meule de travail qui tourne très vite, communique sa vitesse circonférentielle à la meule : il n'en est rien, et l'étude des actions appliquées à la pièce permet d'expliquer ce qui se passe réellement (*fig.* 21).

Si nous supposons la pièce animée d'un mouvement circulaire uniforme, le système des forces appliquées est en équilibre. Pour simplifier le raisonnement, négligeons le poids de la pièce.

En A, point de contact avec la meule de travail, s'exerce sur la pièce l'action de la meule $\vec{A}$. En C, est appliquée l'action du support $\vec{C}$, inclinée en sens inverse du mouvement par suite du frottement ; elle fait donc avec la normale un angle φ_3 égal à l'angle de frottement pièce sur réglette. L'action de la meule d'entraînement doit donc nécessairement passer par le point de concours des deux actions précédentes.

Si l'angle γ_2 est inférieur à l'angle φ_2 de frottement pièce sur meule, il n'y aura pas glissement de la pièce sur la meule et la vitesse périphérique de la pièce sera la même que celle de la meule d'entraînement. La position de la réglette, réglable, permet qu'il en soit ainsi.

Cette étude montre que le terme de meule d'entraînement semble mal choisi, car elle *contrôle* la vitesse de rotation de la pièce en l'empêchant d'être entraînée par la meule de travail à la vitesse de celle-ci. A l'étranger on dit meule de régulation.

4° Étude de l'entraînement de la pièce en translation dans le cas du travail à l'enfilade.

La meule d'entraînement est inclinée par rapport à la meule de travail (*fig.* 22) ; les axes de rotation des deux meules font entre eux un angle α. La face active *aa* de la réglette (*fig.* 23) est parallèle à l'axe *xx'* de la meule de travail.

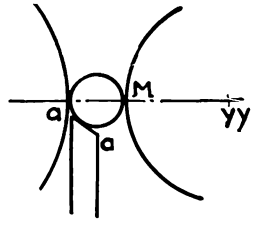


Fig. 23. — Centerless : position de la réglette.

Le contact de la meule d'entraînement et de la pièce doit se faire suivant une génératrice M_1M_2 de la pièce pour que l'action de la meule soit bien répartie. Ainsi, la surface extérieure de la meule d'entraînement est une surface réglée, engendrée une droite N_1N_2 tournant autour d'un axe yy_1 et faisant avec lui un angle α. C'est donc un hyperboloïde de révolution.

On obtient très facilement cette surface : il suffit de tailler la meule à l'aide d'un diamant déplacé suivant N_1N_2 ou suivant une autre génératrice rectiligne : par exemple celle qui est obtenue en faisant tourner la droite N_1N_2 d'un angle de 90° autour de *yy'* (*fig.* 24).

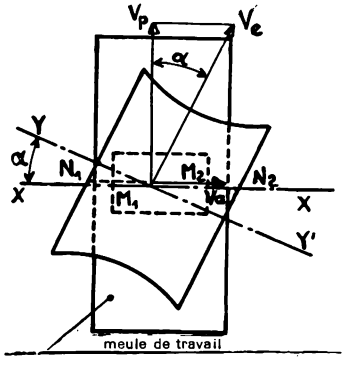


Fig. 22. — Rectification à l'enfilade sur Centerless.

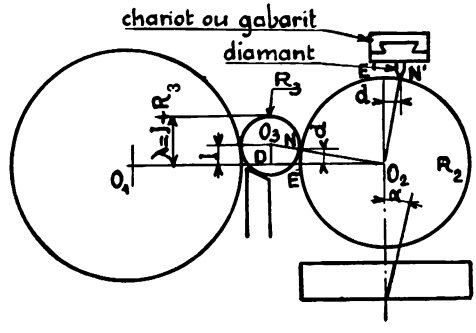


Fig. 24. — Affûtage d'une meule de Centerless.

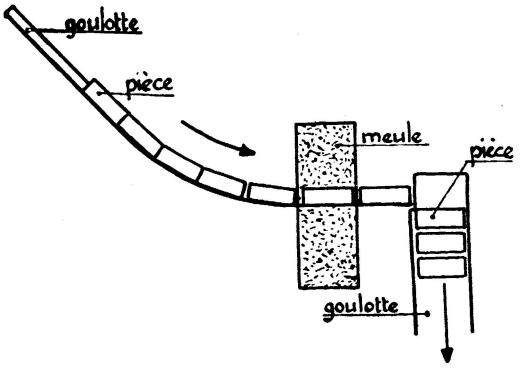


Fig. 25. — Rectification de pièces distribuées.

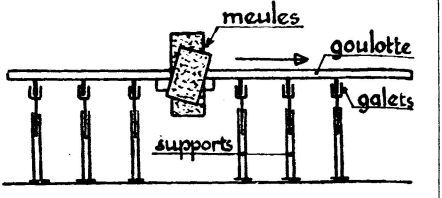


Fig. 26. — Rectification de barres.

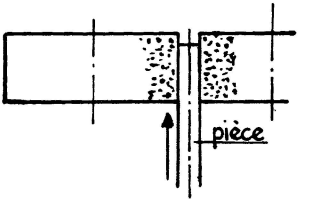


Fig. 27. — Rectification de barres en Centerless.

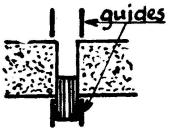


Fig. 28. — Guidage des pièces en rectification à l'enfilade.

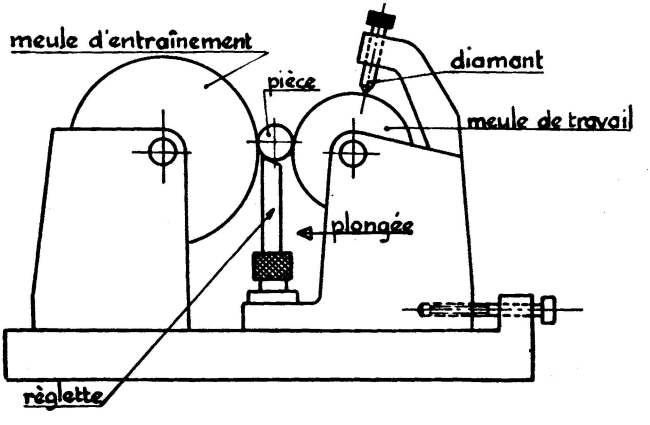


Fig. 29. — Rectification Centerless en plongée.

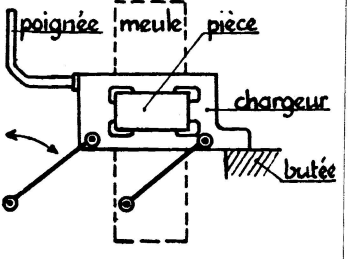


Fig. 30. — Chargeur sur Centerless.

La longueur NE = N'E' = d est appelée « cote de diamantage ». Connaissant la valeur des rayons R_2 et R_3 de la meule d'entraînement et de la pièce ainsi que la distance $O_3D = l$, on peut calculer d en considérant les triangles rectangles O_2NE et O_2O_3D.

On a $$d = l \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

Pratiquement, on choisit la cote d et on calcule l. On contrôle la position de la pièce en mesurant $\lambda = l + R_3$.

La vitesse prise par la pièce est celle de la meule d'entraînement V_e. Comme la pièce est cylindrique, elle prend un mouvement hélicoïdal résultant du mouvement de rotation de vitesse V_p et d'un mouvement de translation de vitesse V_a (*fig.* 22).

On a, évidemment :

vitesse de rotation $V_p = V_e \cos \alpha \cong V_e$

car l'angle α est faible : 5° en valeur moyenne, et

$$V_a = V_e \sin \alpha.$$

En faisant varier l'angle α, on modifie la vitesse d'avance de la pièce c'est-à-dire V_a. Cette vitesse est de l'ordre de 1 à 5 m/mn.

5° Conduite du travail.

Rectification à l'enfilade.

Ce mode de travail est utilisé pour exécuter des séries de petites pièces cylindriques, ou pour rectifier des barres pouvant avoir plusieurs mètres de longueur (*fig.* 27). L'écartement des meules détermine le diamètre de la pièce.

Pour usiner des pièces courtes, on emploie une goulotte de distribution inclinée de telle sorte que le poids des pièces détermine une poussée suffisante pour amener les pièces entre les meules. A la sortie de la machine un plan incliné reçoit les pièces qui, en roulant, rejoignent une caisse : lors de la dernière passe on les recueille généralement à la main (*fig.* 25). Quand on rectifie des barres, il faut les supporter sur toute leur longueur au moyen de galets réglables en hauteur (*fig.* 26 et 27). Dans le cas de pièces courtes, on utilise des guides latéraux (*fig.* 28).

Il faut évidemment effectuer plusieurs passes pour amener la pièce à la cote désirée. En règle générale, on prend pour l'ébauche une vitesse d'avance V_a de 4 à 5 m et une faible vitesse de rotation $V_e = 25$ m/mn. Pour la finition, au contraire, $V_e = 1$ à 2 m, et $V_p = 35$ à 40 m/mn.

Rectification en plongée.

Pour effectuer ce genre de travail, on dispose parallèlement les deux axes des meules dans le plan horizontal et l'on donne à la meule d'entraînement un mouvement continu de pénétration (*fig.* 29). Ce mouvement est perpendiculaire à l'axe de la pièce ; il est manuel ou automatique. Dans ce dernier cas, on réalise un cycle automatique où, dès que la cote est atteinte, la meule d'entraînement et la réglette reculent. La pièce est mise dans un chargeur pour l'amener, à la main, entre les deux meules (*fig.* 30).

Pour la rectification des cylindres, la meule de travail possède souvent un mouvement léger parallèlement à son axe, appelé mouvement de « balayage ». Ce déplacement a une amplitude de l'ordre du millimètre et la fréquence est d'environ 30 aller-retour par minute.

Par rectification en plongée, on peut exécuter des pièces épaulées ou des pièces de forme ; dans ce dernier cas, on taille les meules au profil à obtenir (*fig.* 31 et 32).

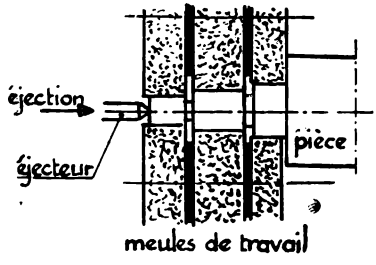


Fig. 31. — Travail en plongée sur trois diamètres.

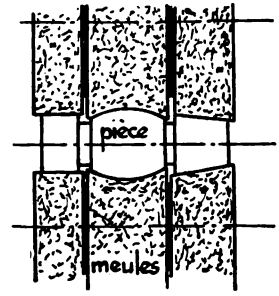


Fig. 32. — Rectification Centerless de pièces de forme en plongée.

C. — Rectification intérieure

La rectification intérieure peut être faite sur des machines où la pièce est entraînée par une broche ou sur des machines dites « Centerless » d'intérieur.

1° Rectification intérieure avec support de pièce monté sur une broche.

a) *Principe. Rectification cylindrique.*

La rectification, dans ce cas, peut être comparée à une opération d'alésage au tour.

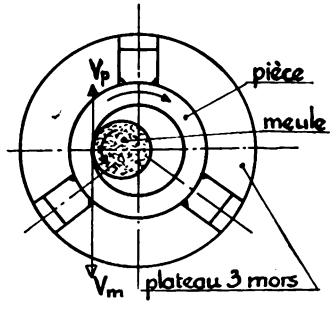


Fig. 33. — Rectification intérieure : principe.

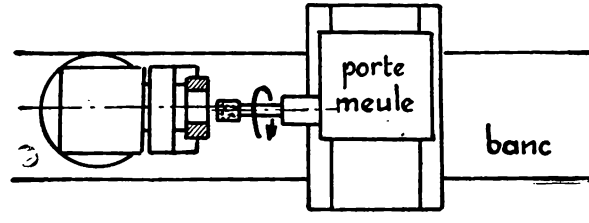


Fig. 34. — Rectification intérieure : machine.

La pièce est montée en plateau muni de mors durs ou de mors doux (*fig.* 33 et 34). La meule est souvent de très petite dimension, et doit tourner très vite : on atteint 80 à 100 000 t/mn. La meule et la pièce tournent en sens contraires.

La vitesse de la pièce est de l'ordre de 10 m/mn et celle de la meule 20 à 30 m/s. La vitesse réelle de coupe est égale à $V = V_m + V_p$ (30 à 40 m/mn).

Les meules d'un diamètre supérieur à 30 mm sont percées pour être montées sur une queue cylindrique qui sert à la lier à la broche.

Les meules d'un diamètre inférieur à 30 mm sont solidaires d'une tige noyée dans la masse de la matière abrasive (*fig.* 35).

On effectue le travail par petites passes successives, en donnant à la meule un mouvement axial de va-et-vient, tandis que s'opère la pénétration dans la pièce à raison de

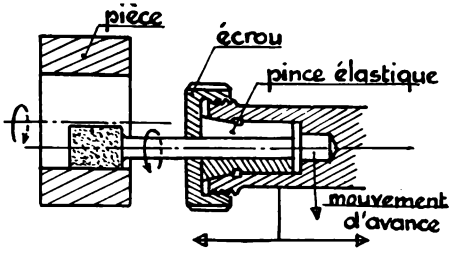


Fig. 35. — Montage d'une petite meule à queue.

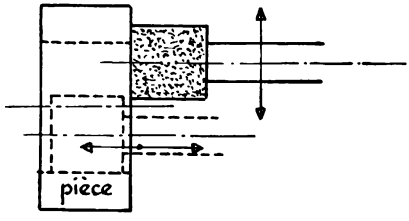


Fig. 36. — Rectification combinée : face et alésage.

0,005 à 0,01 mm par passage de la meule. Lorsque la meule est de diamètre suffisant, on peut, sans démonter la pièce, obtenir l'alésage et le dressage de la face normale à cet alésage (*fig.* 36).

2° Rectification intérieure dans le cas où la pièce est animée du mouvement d'avance en translation, la meule ayant un mouvement épicycloïdal.

On meule la surface entière d'un alésage si l'on fait tourner l'axe du porte-meule autour de l'axe du trou, la pièce restant fixe. Ce mode de rectification est aussi appelé rectification planétaire. Si on désigne par F_1 le sens de rotation du porte-broche, et par F le mouvement de rotation de la meule autour de son axe, le travail de coupe est le même que si, l'axe de la meule demeurant fixe, la pièce tournait dans le sens F'_1 contraire de F_1 (*fig.* 37). Il faut donc que la broche et son support soient animés de deux rotations de même sens ; un déplacement axial est nécessaire pour que la meule explore chaque génératrice de l'alésage sur toute sa longueur : ce mouvement est en général donné au porte-pièce. Cette méthode est intéressante pour les pièces lourdes, ou celles ayant du balourd (*fig.* 38).

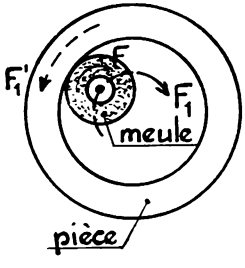


Fig. 37. — Actions en meulage d'intérieur.

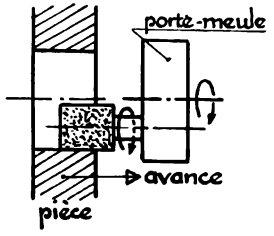


Fig. 38. — Rectification par planétaire.

3° Rectification des alésages tronconiques.

Le principe de ce travail est le même que pour la rectification cylindrique intérieure. L'axe de la pièce xx' et celui de la meule yy' doivent être situés dans un même plan en faisant un angle α égal au demi-angle au sommet du tronc de cône (*fig.* 39).

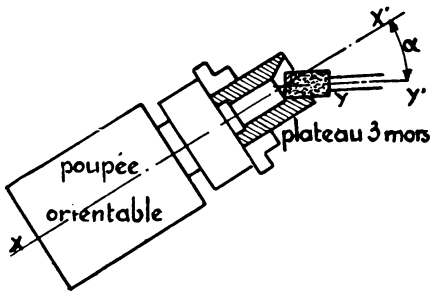


Fig. 39. — Rectification en l'air, d'un cône.

4° Les machines.

Machines à pièce tournante

Elles sont semblables aux machines pour rectification extérieure (*fig.* 13 à 17).

En général, les mouvements d'avance et de pénétration sont donnés à la meule. La poupée porte-pièce peut être orientée autour d'un axe vertical. La broche, sur laquelle peuvent être montées des meules de petits diamètres, doit pouvoir tourner très vite ; on emploie des changeurs de fréquence pour alimenter le moteur qui peut tourner à différents régimes, en fonction de la fréquence du courant qui l'alimente ; la vitesse est liée à la fréquence par la relation : $V_{t/s} = \frac{f}{p}$, f étant la fréquence et p la moitié du nombre de pôles de l'inducteur du moteur ; $p = 1$ pour un moteur à deux pôles. On peut

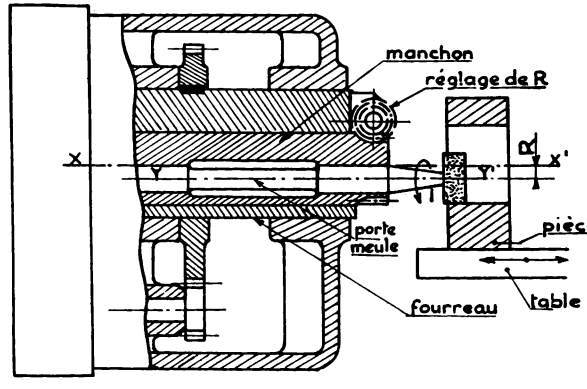


Fig. 40. — Rectification par planétaire : machine Heald.

aussi entraîner la meule au moyen d'une petite turbine (genre roue Pelton) alimentée par de l'huile sous pression ou de l'air comprimé à 200 kg/cm².

Machine à mouvement planétaire.

Il vaut toujours mieux communiquer le mouvement le plus rapide à l'ensemble d'organes de moindre masse, ce qui a conduit les constructeurs à concevoir des

machines où la pièce reste fixe. La meule est animée du mouvement de coupe autour de son axe yy', et d'un mouvement planétaire par la mise en rotation du fourreau porte-broche autour de l'axe xx' (*fig.* 40). Pour permettre l'exécution de différents diamètres avec précision, le fourreau porte-broche est disposé dans un alésage excentré du manchon d'entraînement. A l'arrêt, le réglage de l'excentricité est obtenu avec un réducteur roue et vis sans fin.

5° Rectification intérieure cylindrique « Centerless ».

On rectifie, par ce procédé, des bagues cylindriques bien calibrées extérieurement. La pièce (*fig.* 41) est située dans l'espace au moyen d'un galet support et d'un disque d'entraînement. La meule tourne dans le même sens que la pièce. Les axes des différents organes sont parallèles. Le pénétration de la meule s'effectue suivant la direction OO'. La meule, ainsi, travaille en plongée. On peut obtenir le déplacement axial de la pièce en inclinant l'axe de l'entraîneur par rapport à celui de la pièce ; ce disque entraîneur doit alors être un hyperboloïde de révolution, comme nous l'avons vu pour la rectification extérieure sans centres.

La rectification intérieure Centerless assure une concentricité rigoureuse de l'alésage avec l'extérieur de la bague.

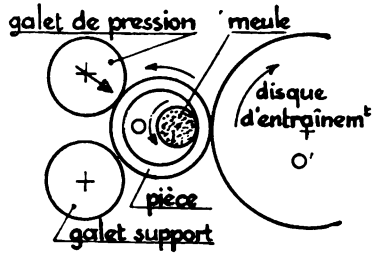


Fig. 41. — Rectification intérieure sans centres.

RECTIFICATION DES PLANS

La réalisation des plans par fraisage et par rectification relève des mêmes principes.

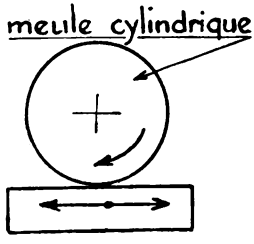


Fig. 42. — Rectification plane par meule tangente.

La meule, comme la fraise, peut être :

- un outil de forme : rectification de profil par meule cylindrique tangente (*fig.* 42),
- un outil d'enveloppe : rectification de face par meule boisseau (*fig.* 43).

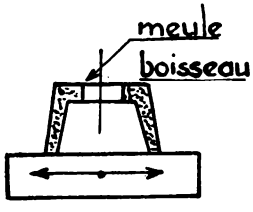


Fig. 43. — Rectification plane par meule de face (boisseau).

Rectification de profil par meule tangente.

a) *La largeur de la meule est supérieure à celle de la pièce.*

La pièce est montée sur la table et animée du mouvement d'avance.

Ce mouvement peut être :

— une translation rectiligne, pour la rectification des pièces longues (*fig.* 44) ;

— une rotation continue, pour la rectification de petites surfaces pouvant être disposées à l'intérieur d'une couronne fictive dont le centre se trouve sur l'axe

de rotation de la table circulaire, et dont la largeur est égale à l'épaisseur de la meule (*fig.* 45).

La meule doit être parfaitement cylindrique, et il faut la réaffûter fréquemment,

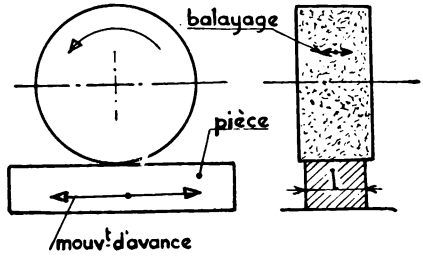


Fig. 44. — Rectification plane par meule de largeur.

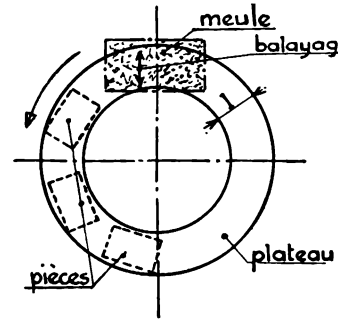


Fig. 45. — Rectification plane par meule étroite.

surtout pour les passes finales, en utilisant un diamant fixé sur un petit chariot à guidages soignés. Un léger « balayage » garantit un meilleur état de surface et maintient la rectitude de la génératrice de la meule.

b) *La largeur de la meule est inférieure à celle de la pièce.*

La meule travaille sur toute sa largeur pour la première passe (*fig.* 46). Lorsque la meule s'est dégagée en fin de course le déplacement relatif de la pièce par rapport à la meule se produit parallèlement à l'axe de la meule ; une nouvelle passe commence, la translation de la pièce ayant changé de sens. Quand toute la surface de la pièce a été rectifiée, on refait une nouvelle série de passes après avoir rapproché la pièce de la meule de quelques centièmes de millimètre. Il existe des machines à table tournante (*fig.* 47). Le déplacement de la meule parallèlement à son axe est continu.

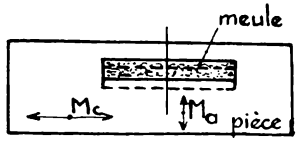


Fig. 46. — Rectification de pièces multiples : plateau magnétique.

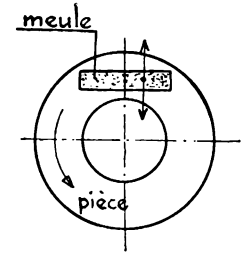


Fig. 47. — Rectification d'anneau par meule étroite.

Rectification de face par meule boisseau.

L'outil est une meule boisseau cylindrique ou conique. Le diamètre de la meule doit être supérieur à la largeur de la pièce afin que les copeaux puissent se dégager facilement. Dans le cas contraire, les copeaux produits s'amasseraient entre *a* et *b* : la pièce serait rayée (*fig.* 48-49).

Sur les grosses machines, on monte des meules dites « segmentées », constituées par des éléments fixés sur un tambour au moyen de coins (*fig.* 50). Ces meules conviennent bien pour l'arrosage de l'intérieur vers l'extérieur, qui favorise l'évacuation des copeaux.

Meulage de plans associés.

Les méthodes générales d'usinage peuvent être appliquées :

a) *On usine d'abord une face de référence*, la plus importante possible ; elle sert de face de liaison avec le porte-pièce pour les opérations suivantes : fixation en étau, sur table, sur équerre ou porte-pièce spécial. Il faut évidemment réaliser la fixation de la pièce avec beaucoup de soin, surtout pour éviter des déformations.

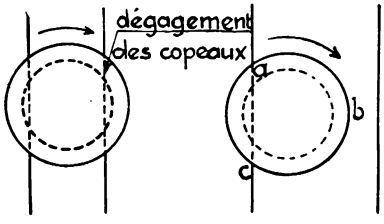


Fig. 48-49. — Dégagement des copeaux en rectification.

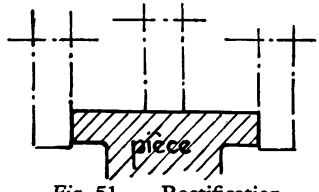


Fig. 51. — Rectification de deux plans parallèles.

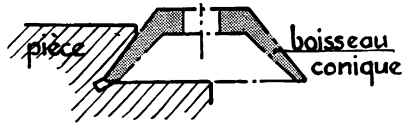


Fig. 53. — Rectification d'une queue d'aronde : boisseau conique.

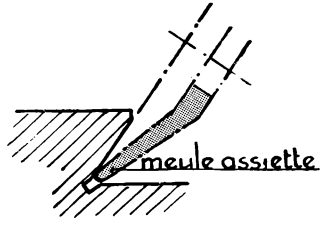


Fig. 55. — Rectification d'une queue d'aronde : meule assiette. 2e opération

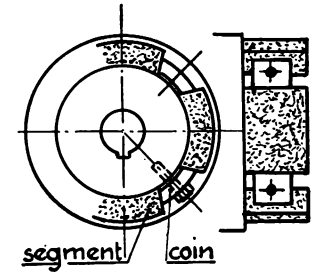


Fig. 50. — Meule boisseau segmentée.

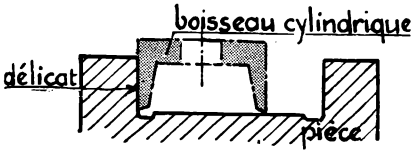


Fig. 52. — Rectification de trois plans orthogonaux.

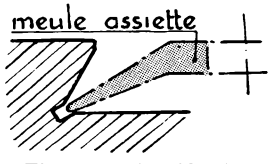


Fig. 54. — Rectification d'une queue d'aronde : meule assiette. 1re opération

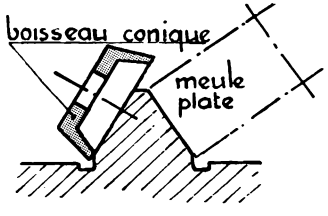


Fig. 56. — Rectification de vés de guidage.

b) *On s'efforce de rectifier le plus grand nombre possible de surfaces sans démonter la pièce.* La meule doit être profilée en conséquence. La meule plate peut travailler sur sa périphérie et sur ses faces ; le boisseau, sur sa face d'extrémité

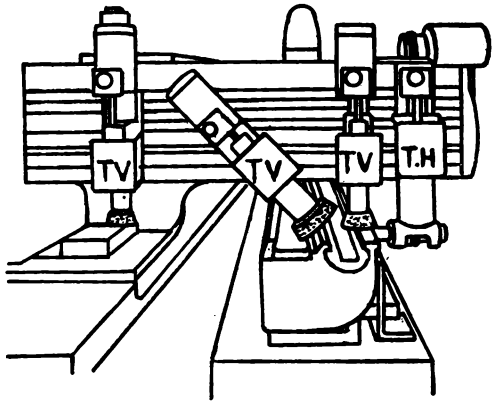


Fig. 57. — Machine à rectifier à têtes multiples.

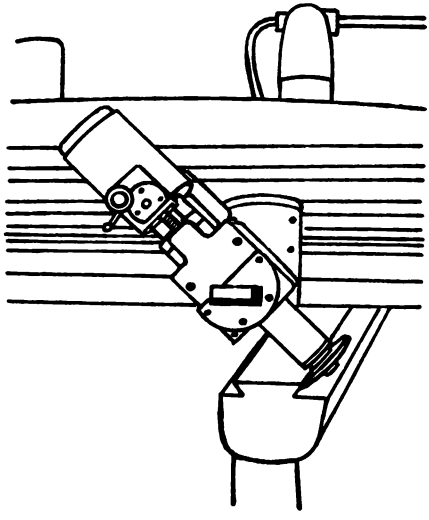


Fig. 58. — Rectification d'une glissière à queue d'aronde.

et sur sa périphérie. Pour éviter une usure trop rapide des meules, on recommande de prévoir des dégagements de meule sur les pièces (c'est l'affaire du dessinateur détaillant). Les *figures* 51 à 56 représentent les différents usinages-types réalisables avec des meules plates et des boisseaux.

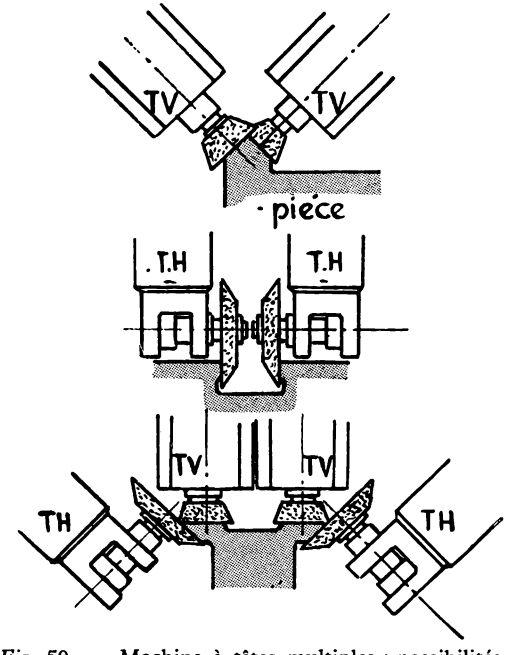


Fig. 59. — Machine à têtes multiples : possibilités.

Les machines.

Les machines à rectifier les plans sont de conception assez simple, mais leur fabrication est délicate. Certaines peuvent avoir des courses de table atteignant 3 mètres, ce qui nécessite des glissières de 6 à 7 mètres, déterminant les dimensions minima du bâti de ces machines. Les machines modernes sont toutes à commande hydraulique ; les mouvements d'avance et de pénétration de meule sont manuels et automatiques. Les copeaux produits sont aspirés au

fur et à mesure de leur production. Ces machines sont souvent équipées de plateaux magnétiques, alimentés en courant continu ou en alternatif redressé ; ces installations doivent être complétées par des appareils démagnétiseurs éliminant tout magnétisme rémanent pouvant affecter la pièce usinée.

Pour rectifier les glissières des machines-outils, on a créé des machines spéciales, souvent d'ailleurs de grandes dimensions afin de recevoir des bâtis à usiner. Ces machines possèdent, en général, plusieurs broches porte-meules pouvant être inclinées ; elles ressemblent aux raboteuses-fraiseuses et permettent la rectification simultanée de plusieurs plans contenant des droites parallèles au déplacement de la table. Les *figures* 57-58 montrent ce que l'on peut obtenir avec des machines à têtes inclinables.

La *figure* 59 montre les possibilités d'une machine à têtes multiples.

CONDITIONS DE TRAVAIL EN RECTIFICATION

Étude de l'outil.

Le mode d'action de la meule a été étudié (voir *tome* « classe de seconde ») ; rappelons brièvement les caractéristiques essentielles des meules.

On définit une meule par :

a) *sa forme et ses dimensions.*

Les dimensions sont données en millimètres dans l'ordre suivant :

diamètre, épaisseur, alésage.

Exemple : 254 × 32 × 25.

b) *ses spécifications définissant sa constitution* qu'on écrit dans l'ordre suivant :

abrasif : une lettre, ou un nombre et une lettre ;
grosseur du grain : un nombre ;
grade : une lettre ;
structure : un nombre ;
agglomérant : une ou plusieurs lettres.

Exemple : 38A-60-K-6-VBE.

Abrasif : 38A. Grosseur du grain : 60. Grade : K. Structure : 6. Agglomérant : VBE.

Les abrasifs.

Ils comprennent :

a) *Les abrasifs alumineux* constitués surtout par de l'alumine cristallisée. Leur symbole est la lettre A.

Selon leur degré de pureté et leur mode de cristallisation on distingue différents abrasifs alumineux auxquels on affecte un nombre qui précède la lettre A. On les appelle alundum ou corindon.

Le corindon supérieur est de l'alumine presque pure (99 %) ; référence 32 et 38 A ; il est blanc.

Le corindon spécial est moins pur (95 %) ; référence 19 A.

Le corindon ordinaire renferme 80 à 95 % d'alumine ; il est coloré en rose ou en brun par des oxydes de fer ou de titane : symbole A.

Les abrasifs alumineux sont très durs ; ils conviennent pour usiner les aciers et, en général, les métaux résistants.

b) *Les abrasifs carbure de silicium* de symbole C.

On trouve :

le crystolon 37, de couleur noire, symbole 37 C ;
le crystolon 39, de couleur verte, symbole 39 C.

Les carbures de silicium sont plus fragiles que les alumineux et plus durs ; on les utilise pour la fonte, les métaux non ferreux et, en général, pour les métaux faiblement résistants.

Grosseur du grain.

Elle est précisée par un nombre de 1 à 3 chiffres.

De 8 à 240, ce nombre représente le nombre de mailles par pouce linéaire du tamis à travers lequel la poudre a passé. Plus le nombre est élevé, plus le grain est fin. Au-delà de 240, le nombre traduit le temps, en heure, mis pour que la poudre se rassemble au bas d'un vase : décantation ou lévigation.

Le tableau ci-dessous donne le classement des grains par catégorie (grains les plus employés).

Très gros	Gros	Moyen	Fin	Très fin	Poudre
8	12	30	90	220	400
10	14	36	100	240	500
	16	46	120	280	600
	20	54	150	320	
	24	60	180		
		70			
		80			

Les états de surface obtenus en fonction de la grosseur du grain sont définis comme suit pour la rectification :

Opération	Sillons très visibles	Fini moyen	Fini commercial	Très beau fini	Poli	Poli miroir
Rectification cylindr.	36	46	60	80 à 120	150-240	500
Rectification plane..	20-24	30-36	46	60 à 80	80-150	500

Le fini poussé exige qu'à chaque opération la meule enlève les traits laissés par l'opération précédente. Ainsi, pour obtenir une pièce « poli miroir », il faudra utiliser successivement en rectification les meules ayant des grains : 60-120-240-500.

Grade.

Le grade caractérise la force avec laquelle l'agglomérant lie les grains d'abrasif. Il est d'usage de caractériser également par le grade la dureté de la meule bien qu'en réalité elle n'ait pas de rapport avec la dureté de l'abrasif.

Une meule dont l'agglomérant lie faiblement les grains d'abrasif est tendre, ainsi que son grade.

Des lettres, choisies de D à Z, désignent les grades comme suit :

Très tendre	D, E, F, G ;
Tendre	H, I, J, K ;
Moyen	P, Q, R, S ;
Très dur	T, U, W, Z.

Règles générales permettant d'aider à choisir le grade

Principe : *Le grain d'abrasif doit se détacher dès qu'il est émoussé, sans quoi il frotte sur la pièce en l'échauffant, ce qui peut provoquer déformations et criques.*

En application de ce principe, nous considérerons les facteurs dont dépend l'usure

— longueur de la trajectoire de contact du grain d'abrasif avec la pièce,
— nature du métal usiné,
— vitesse de la meule,
— vitesse de la pièce,
— qualité de la machine employée.

Influence de la trajectoire de contact sur le choix du grade

Si la trajectoire de contact des grains d'abrasif est longue, l'usure croît et le grain doit être plus souvent remplacé : la meule doit donc être tendre.

Ainsi, en rectification plane, avec meule boisseau, on choisit un grade de D à K. En rectification cylindrique extérieure, et pour l'affûtage d'outils, on adopte des meules plus dures : de J à Q.

En rectification cylindrique intérieure, l'arc de contact est plus long qu'en rectification extérieure, et l'on choisit des meules légèrement plus tendres.

Influence de la dureté du métal travaillé

Un métal dur use plus rapidement les grains d'abrasif qu'un métal tendre, à égalité de trajectoire de contact.

On choisit donc des meules tendres pour la rectification des métaux durs, et, inversement, des meules dures pour la rectification des métaux tendres.

Le tableau page 258 donne les grades moyens généralement adoptés pour quelques métaux et pour les opérations usuelles.

Valeurs moyennes — CHOIX DES GRADES — Échelle Norton

Matières usinées	Rectification cylindrique		Rectification plane		Rectification Centerless	Tronçonnage
	Agglomérant vitrifié		Agglomérant vitrifié		Agglomérant vitrifié	Agglomérant organique
	Extérieure	Intérieure	Meule plate	Meule boisseau		
Acier de construction traité	L	K	I	H	L	Q
Acier de construction non traité	N	M	J	J	M	W
Acier nitruré	J	H	H	G	S	I
Acier inoxydable à 13 % de Cr	L	K	I	H	M	S
Fonte ordinaire	L	J	K	J	M	
Bronze	K	J	K	I	M	W
Alliages légers	K	I	J	I	K	
Acier à coupe rapide	L	K	I	H	L	O
Carbures métalliques	J	I	I	H		
			Avec abrasif diamant			
			L	L		

Influence de la vitesse de la meule

La coupe du métal produit un dégagement de chaleur qui augmente au fur et à mesure que les grains abrasifs s'usent ; cette chaleur gagne peu à peu l'agglomérant qui se ramollit et qui, par conséquent, libère plus facilement les grains usés. Lorsque la vitesse de la meule est faible, le grain abrasif reste plus longtemps en contact avec la pièce, et la chaleur affecte plus rapidement l'agglomérant. Si la meule tourne vite, la chaleur produite ne peut se transmettre aussi bien à l'agglomérant car le grain quitte la pièce plus vite et se refroidit mieux dans l'air : les grains se détachent plus difficilement ; on dit que la meule se « déshabille » moins vite.

La meule semble plus dure quand elle tourne vite et plus tendre quand sa vitesse diminue.

Influence de la vitesse de la pièce en rectification cylindrique

Si la vitesse de la pièce augmente, le temps de contact pièce-meule diminue.

La meule paraît plus dure que si la pièce tourne à plus faible vitesse.

Influence de l'état de la machine

Les vibrations de la machine favorisent le détachement prématuré des grains abrasifs ; il faut donc, sur des machines un peu fatiguées, monter des meules un peu plus dures que sur des machines neuves.

Structure.

La structure est l'indice de tassement des grains d'abrasifs. Les vides laissés servent à loger les copeaux produits pendant le travail.

Une meule dont les grains sont espacés est dite à structure ouverte ; elle convient pour des travaux où la trajectoire de contact est importante ou pour des usinages à grands débits (profondeur de coupe importante).

Un nombre caractérise la structure d'une meule :

0-1-2-3 : structure dense, grains serrés ;

4-5-6 : structure normale ;

7-8-9-10-11-12 : structure ouverte, grains très écartés.

On choisit la structure normale dans la plupart des cas de rectification cylindrique extérieure (indice 5).

Pour les travaux de rectification intérieure et de surfaçage, on prend une structure plus ouverte : 7-8-9.

Agglomérants.

Les agglomérants utilisés pour lier les grains d'abrasif sont minéraux ou organiques.

I. — *Agglomérants minéraux.*

a) les agglomérants vitrifiés (indice V) sont des verres obtenus en cuisant du sable, de l'argile, du feldspath. La coloration est fonction de la pureté de l'agglomérant, et de l'argile en particulier.

Les agglomérants ordinaires ont une teinte grise ou brune ; les agglomérants supérieurs sont roses ou blancs. Le symbole, dans ce dernier cas, comporte un indice de pureté (en échelle NORTON, l'agglomérant vitrifié supérieur est le V.B.E.). Les meules vitrifiées sont les plus employées, car elles supportent bien tous les liquides d'arrosage,

b) les agglomérants silicatés (indice S) sont constitués par du silicate de soude. Ils ne sont guère utilisés que pour des travaux de surfaçage.

II. — *Agglomérants organiques.*

Résinoïde	indice B.
Shellac	indice E.
Caoutchouc	indice R.

En raison de leur grande conductibilité, les agglomérants résinoïde et Shellac entrent surtout dans la composition des meules minces de tronçonnage et d'affûtage, et de quelques meules à grain fin employées pour réaliser, en rectification, le poli-miroir.

Les agglomérants caoutchouc entrent dans la fabrication des meules de contrôle de vitesse (meules d'entraînement) montées sur les machines à rectifier centerless.

Vitesses d'utilisation des meules

Le rendement d'une meule est généralement lié à sa vitesse, choisie comme il est indiqué dans le tableau ci-dessous. Pour avoir une sécurité suffisante contre l'éclatement provoqué par la force centrifuge, on ne doit jamais dépasser ces valeurs.

On remarquera que les vitesses circonférentielles-limites augmentent quand le grade devient plus dur ; elles sont plus élevées pour les agglomérants organiques que pour les agglomérants minéraux.

Valeur des vitesses circonférentielles-limites.

a) *Meules à agglomérant minéral.*

Vitrifié et au silicate.

1° *Meules plates et analogues*	grade tendre	25 m/s.
	grade dur	33 m/s.
2° *Meules cylindriques, assiette, boisseau*	grade tendre	23 m/s.
	grade dur	28 m/s.

b) *Meules à agglomérants organiques.*

1° *Meules plates*	grade tendre	30 m/s.
	grade dur	50 m/s.
3° *Meules cylindriques, assiette, boisseau*	grade tendre	25 m/s.
	grade dur	40 m/s.
3° *Meules de tronçonnage*	grade tendre	50 m/s.
	grade dur	60 m/s.

Vitesse circonférentielle de la pièce.

a) *Rectification cylindrique extérieure ou intérieure.*

La vitesse de rotation de la pièce est de 5 à 25 m/mn. Elle doit être plus faible pour dégrossir que pour finir.

b) *Rectification sans centre.*

La vitesse tangentielle de la pièce est la même que celle de la meule de contrôle : 40 à 80 m/mn.

Déplacement relatif pièce-meule (mouvement d'avance).

a) *Rectification cylindrique.*

Pour éviter d'user inutilement la meule, il serait souhaitable que la trace de la meule sur la pièce soit un ruban hélicoïdal sans recouvrement (*fig.* 60).

Le déplacement axial relatif pièce-meule, par tour de pièce, serait alors exactement égal à la largeur de la meule.

Mais, si l'on procède ainsi, tous les défauts de la génératrice de la meule se reproduisent intégralement sur la pièce. On préfère donc diminuer l'avance par tour de la meule, pour que la trace hélicoïdale soit de pas plus court et comporte recouvrement.

En ébauche, le mouvement axial relatif pièce-meule est pris égal à la moitié de la largeur de la meule par tour de pièce, et, en finition, au quart et même jusqu'au huitième.

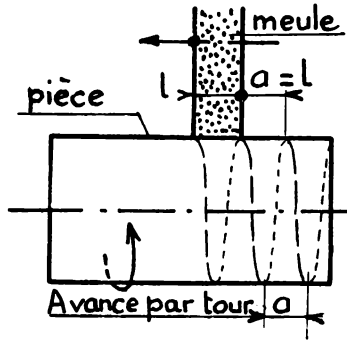


Fig. 60. — Rectification sans recouvrement.

Si Vm/mn est la vitesse circonférentielle de la pièce, Um/mn la vitesse relative de translation axiale pièce-meule, D, le diamètre de la pièce en m, E la largeur de la meule en m, et $\frac{E}{k}$ le déplacement relatif pièce-meule par tour de pièce, on peut écrire :

Nombre de tours de la pièce par minute :

$$n = \frac{V}{\pi D}.$$

Le déplacement relatif axial pièce-meule par minute s'exprime alors ainsi :

$$U = \frac{E}{k} n = \frac{EV}{k\pi D}.$$

APPLICATION : D = 40 mm, V = 15 m/mn, largeur de meule E = 60 mm.

Pour l'ébauche, prenons $k = 2$; on a :

$$U = \frac{0{,}06 \times 15}{2 \times 3{,}14 \times 0{,}04} = 3{,}6 \text{ m/mn.}$$

Demi-finition, $k = 4$:

$$U = 1{,}6 \text{ m/mn}$$

Finition, K = 8 :

$$U = 0{,}8 \text{ m/mn.}$$

b) *Rectification Centerless.*

Nous avons vu que la vitesse circonférentielle de la pièce est égale à celle de la meule de contrôle des vitesses, V. La vitesse de translation de la pièce U est donnée par la relation :

$$U = V \sin \alpha \text{ (\textit{fig.} 21).}$$

La relation précédente devient :

$$V \sin \alpha = \frac{EV}{k\pi D}$$

d'où

$$\sin \alpha = \frac{E}{k\pi D}.$$

APPLICATION : E = 80, D = 40.

Ebauche : $k = 2$,

$$\sin \alpha = \frac{0{,}080}{2 \times 3{,}14 \times 0{,}04} = 0{,}03 \qquad \alpha = 18^{\circ}.$$

Finition : $k = 8$,

$$\sin \alpha = \frac{0{,}080}{8 \times 3{,}14 \times 0{,}04} \qquad \alpha = 4^{\circ}40'.$$

Mouvement de pénétration.

En rectification, on prévoit souvent des opérations d'ébauche et de finition, ou même d'ébauche, de demi-finition et de finition. Chacune d'elles exigent, en principe, un outil différent. Les meules d'ébauche auront un grain plus gros que celles de finition, et, par conséquent, les profondeurs de passe doivent diminuer avec le grain choisi. C'est ainsi que l'on adopte :

- — pour les grains de grosseur 30 à 40, utilisés en ébauche, des profondeurs de passe de 0,05 à 0,1 ;
- — pour les grains 60 à 80 : 0,02 à 0,01 ;
- — pour les grains les plus fins, une profondeur de passe pouvant atteindre 0,001 mm.

MÉTHODE GÉNÉRALE DE TRAVAIL

Une ou plusieurs passes d'ébauche laisseront à la pièce une surépaisseur de 0,05 à enlever en finition.

Pour la finition, on effectue 4 ou 5 passes avec des pénétrations de l'ordre de 0,01 mm.

Enfin, sans donner de pénétration à la meule, on effectue quelques passages (2 à 4) jusqu'à extinction de toute étincelle : ceci pour enlever les surépaisseurs locales dues aux déformations élastiques de la pièce et de la machine.

Arrosage.

On ne devrait jamais faire de meulage à sec, ne serait-ce que pour sauvegarder la santé de l'opérateur. Dans les cas où cela peut être nécessaire, on doit étudier un dispositif d'aspiration des poussières.

En outre, l'arrosage est recommandé pour :

a) refroidir la pièce et emporter les calories produites,

b) faciliter la coupe des grains abrasifs, qui sont de véritables outils tranchants,

c) entraîner les copeaux et les débris de meule.

Il faut choisir un liquide qui ne fasse pas rouiller la pièce ni la machine, et qui n'attaque pas la peinture de cette dernière.

Si l'on emploie un liquide sous forte pression, il faut adopter une meule plus dure ; inversement, pour travailler à sec, on prend une meule plus tendre.

La nature du lubrifiant peut affecter l'état de surface de la pièce ; pour la rectification des matières plastiques, le choix du lubrifiant est capital si l'on veut éviter l'encrassement de la meule.

Liquides d'arrosage (d'après Norton).

Pièces en acier :

Agglomérant V.....	eau	200 l
	carbonate de potasse anhydre...	7 kg
	carbonate de soude	1 kg
	huile de colza	3 l
Agglomérant S	eau	200 l
	carbonate de soude anhydre ...	4 kg
	huile de colza	3 l
Shellac-caoutchouc	eau pure, eau faiblement alcaline, ou savonneuse.	
Résinoïde	eau pure, eau faiblement alcaline, ou savonneuse, ou pétrole.	

Fonte	eau	300 l
	huile soluble	1 l
	phosphate trisodique	1,5 kg
Aluminium	Pétrole.	

Mode d'arrosage.

C'est surtout la pièce qui doit être arrosée pour éviter qu'elle se déforme. Pour que le vide provoqué par la rotation rapide de la meule n'attire pas le réfrigérant surtout contre elle, il faut employer un tuyau d'amenée dont l'*ajutage* soit disposé comme le montre la *figure* 61.

Les meules à agglomérant vitrifié sont poreuses. Cette propriété permet l'arrosage

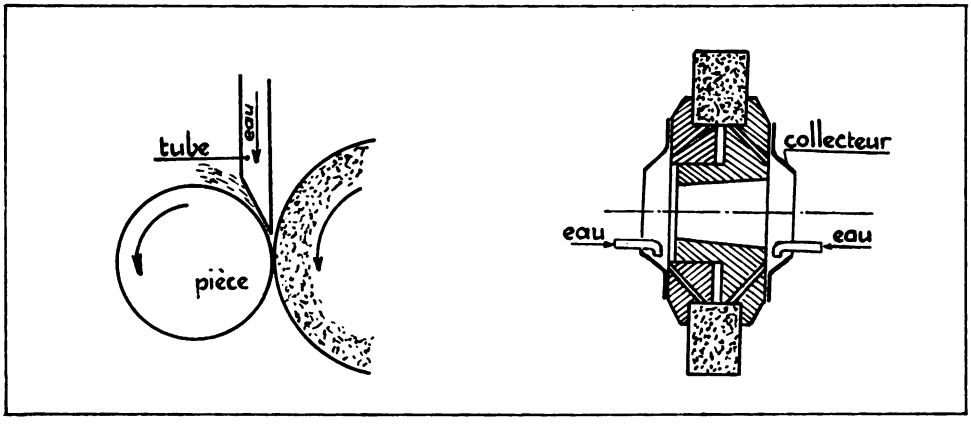


Fig. 61. — Arrosage d'une meule par ajutage spécial.

Fig. 62. — Arrosage d'une meule par l'intérieur.

à travers la meule : sous l'effet de la force centrifuge, le liquide se fraie un passage dans la matière même de la meule, entraînant avec lui les copeaux et les débris d'abrasif et d'agglomérant. La meule peut être montée sur des flasques spéciaux comme le montre la *figure* 62. Ce procédé s'applique efficacement aux travaux de surfaçage et d'affûtage.

Avantages et conditions de réalisation de l'arrosage à travers la meule.

La meule est bien refroidie et le liquide amené au contact exact pièce-meule. Mais la meule risque de se colmater si le liquide d'arrosage n'est pas maintenu très propre ; il faut donc le filtrer. Les meilleurs filtres semblent être ceux à carton filtrant (analogue au buvard) ; il existe même une machine, fort coûteuse d'ailleurs, où l'élément filtrant est une bande de papier en déroulement continu. Pour éliminer les copeaux en *métaux ferreux*, on peut employer des appareils à séparation magnétique (à tambour tournant).

II. — EXÉCUTION D'ÉTATS DE SURFACE DE HAUTE QUALITÉ

Leur nécessité.

En mécanique de précision, les jeux de fonctionnement sont souvent de l'ordre de quelques microns.

Les meules dont l'abrasif est d'indice 60 laissent sur la pièce des sillons dont la profondeur moyenne est de 1 à 2 microns. Le frottement des surfaces en contact provoque l'usure rapide des crêtes de ces sillons, et le jeu se manifeste entre les pièces assemblées.

D'autre part, on reproche à la rectification de modifier l'extérieur des pièces sur une profondeur de 2 à 3 microns : la structure du métal serait altérée sous l'action de la chaleur développée par la coupe, avant sa diffusion au sein de la pièce, et les effets des traitements thermiques dans la zone d'action de l'outil seraient profondément modifiés sur une très faible épaisseur, à laquelle a été donné le nom de « couche de Bailby ». Ces remarques ont fait se développer des techniques nouvelles pour améliorer l'état des surfaces rectifiées en tentant de faire disparaître cette couche sous-jacente. Ce sont :

la rectification fine, le rodage, le superfini.

RECTIFICATION FINE

Principe.

On utilise, successivement, des meules de grains de plus en plus fins. Chaque meule doit enlever les traits laissés par l'opération de rectification précédente. Pour obtenir le poli-miroir, par exemple, dont la profondeur des stries est de l'ordre du micron, on utilisera successivement des grains : 60-120-240 et 500.

Conditions de réalisation.

Les machines à rectifier doivent être de très grande précision ; elles doivent permettre le contrôle des avances relatives pièce-meule en profondeur de l'ordre de 0,5 micron.

Résultats obtenus.

La rectification fine assure :

— une très grande précision géométrique,

— l'élimination de la couche de Bailby,

— un état de surface exigé en construction de mécanique de haute précision.

La haute précision géométrique est obtenue grâce à la haute qualité des machines employées.

La suppression de la couche de Bailby peut s'expliquer ainsi :

l'échauffement superficiel produit par la coupe est fonction des dimensions du copeau détaché et, d'autre part, il diminue si la pression de la meule sur la pièce diminue,

si l'arrosage est efficace et si la vitesse est plus réduite. Les trois premières conditions sont satisfaites en rectification fine car, l'abrasif étant fin, la section du copeau est faible et la pression locale de la meule, déformant élastiquement la pièce est plus réduite. Par surcroît, l'arc de contact est court, et ceci favorise l'action du liquide d'arrosage. La condition de vitesse qui fait intervenir la notion de durée d'évacuation d'une quantité de chaleur bien définie, a moins d'importance puisque la quantité de chaleur est faible.

Applications.

La rectification fine est surtout utilisée en rectification cylindrique pour fabriquer des appareils de mesure, des appareils d'optique et des machines-outils de haute précision, en raison des qualités géométriques recherchées (machines à pointer par exemple).

RODAGE

Le rodage a surtout pour but l'amélioration des états de surface en diminuant l'importance des stries de rectification. Il ne permet pas de corriger les défauts de forme mais, simplement, de parachever des états de surface sur des pièces géométriquement exactes.

Principe.

L'érosion des crêtes des sillons de rectification est obtenue par croisement des trajectoires de grains abrasifs de plus en plus fins, de l'indice de grosseur 80 vers l'indice 800.

L'abrasif est porté par un outil appelé rodoir. Ce rodoir peut être constitué :

a) par des bâtonnets abrasifs de section prismatique, logés sur un support; leur composition est identique à celle des meules. Les *figures* 63*a*-63*b* montrent un rodoir pour surfaces cylindriques intérieures (opération dite de glaçage des cylindres);

b) par une pièce métallique (fonte le plus souvent) sur le pourtour de laquelle on incruste des grains abrasifs. On réalise ainsi des outils expansibles pour les petits diamètres d'alésage (*fig.* 64), ou des marbres plans : marbres rectangulaires pour rodage manuel, marbres annulaires pour machines à roder les surfaces planes ou cylindriques.

L'incrustation des grains s'obtient en faisant rouler le rodoir sur un marbre (*fig.* 65), la poudre abrasive est diluée dans de l'huile légère.

La trajectoire des grains abrasifs affecte, selon les cas, les formes suivantes :

— *sur surfaces planes :* courbes parallèles en forme de huit (*fig.* 66);

— *sur surfaces cylindriques :* hélices à pas contraires, dont l'angle de pente est d'environ 30° (*fig.* 67) ;

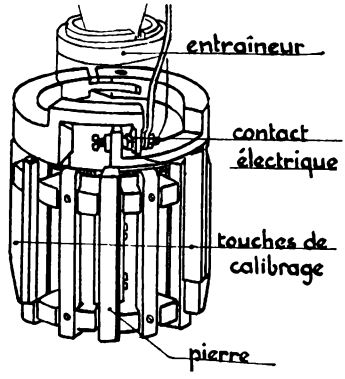


Fig. 63 *a.* — Rodoir à expansion automatique.

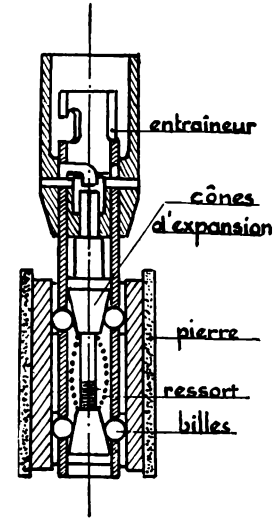


Fig. 63 *b.* — Rodoir Truba, expansible en marche.

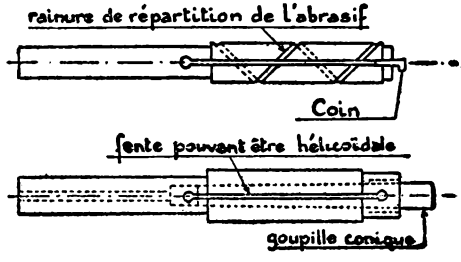


Fig. 64. — Rodoirs cylindriques pour alésages.

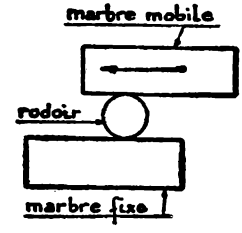


Fig. 65. — Chargement d'un rodoir cylindrique.

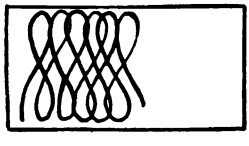


Fig. 66. — Rodage en 8.

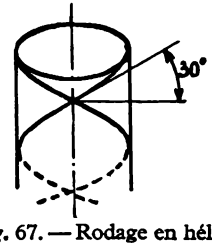


Fig. 67. — Rodage en hélice.

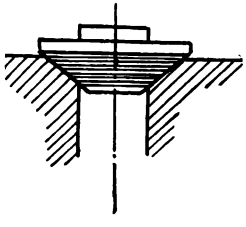


Fig. 68. — Rodage circulaire.

— *sur surfaces coniques :* chaque grain trace une circonférence dans un sens, puis dans l'autre. L'ensemble des circonférences constitue une surface conique (*fig.* 68).

Mode opératoire.

Une pression doit appliquer le rodoir sur la pièce ; elle est de l'ordre de 1 à 5 kgf/cm². On doit abondamment lubrifier pour assurer l'élimination rapide des calories produites. On utilise :

1° *pour le rodage à la pierre :* l'huile de coupe légère pour les aciers doux, un mélange d'huile de coupe et de pétrole pour les aciers traités et le gas-oil pour les autres métaux ;

2° *pour le rodage au rodoir métallique :* le gas-oil ou le pétrole.

Le déplacement relatif du rodoir par rapport à la pièce se fait à faible vitesse : 2 à 40 m/mn.

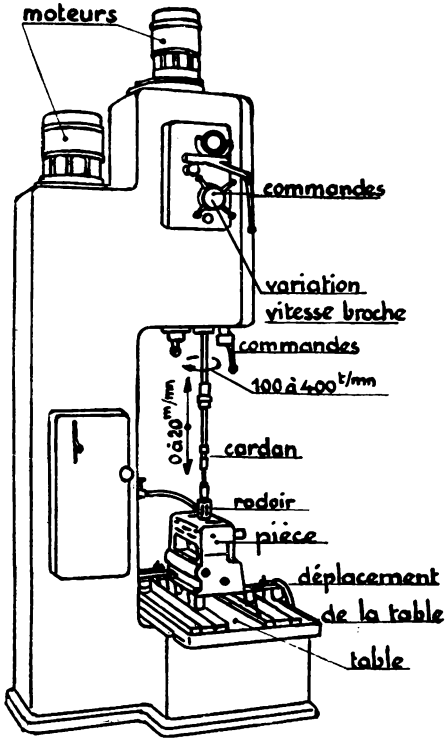


Fig. 69. — Machine à roder les cylindres.

Différentes opérations de rodage mécanique.

Le rodage manuel est une opération réservée aux ateliers d'outillage et d'entretien ; on l'applique aux surfaces planes (marbres) ou aux surfaces coniques en vue d'obtenir l'étanchéité (vannes, robinets, soupapes).

En fabrication de série, le rodage sert à parachever des surfaces cylindriques intérieures ou extérieures, des surfaces planes et des surfaces coniques.

a) *Rodage de surfaces cylindriques intérieures.*

L'outil porte des bâtons-rodoirs fixés sur un support expansible (*fig.* 63). Cet outil est monté flottant sur la broche de la machine (joint de cardan). Il reçoit deux mouvements simultanés (*fig.* 69) :

une rotation à la vitesse circonférentielle de 40 m/mn.

une translation alternative à la vitesse de 20 m/mn.

Sur de nombreuses machines, la vitesse de translation est variable pendant le travail afin que les traces du rodoir se recouvrent sans cesse.

L'outil se centre lui-même dans l'alésage et, ainsi, son axe coïncide toujours avec celui

de l'alésage usiné préalablement à l'outil unique en carbure ou en diamant. On agit périodiquement sur le dispositif de réglage du rodoir pour compenser l'usure. On n'enlève que quelques centièmes de mm à enlever par rodage. En rodage intérieur, les défauts d'ovalisation sont corrigés.

b) *Rodage de surfaces cylindriques extérieures ou de surfaces planes et parallèles.*

Le rodoir est constitué par une couronne en fonte, à face rigoureusement plane, et animée d'un mouvement de rotation suivant f autour de son axe vertical (*fig.* 70).

Les pièces cylindriques (de même diamètre), ou des pièces à faces parallèles de même épaisseur, sont posées sur la couronne. Pour les séparer, on les loge dans une cage dont les évidements épousent la forme des pièces. Cette cage reçoit un mouvement d'excentrique par rapport à l'axe du rodoir. Une deuxième couronne en fonte est placée sur les pièces ; elle a sa face de contact également parfaitement plane, et elle agit sur les pièces sous son propre poids et sous l'action d'un ressort taré. Elle ne tourne pas, mais est montée très libre sur son axe (montage flottant).

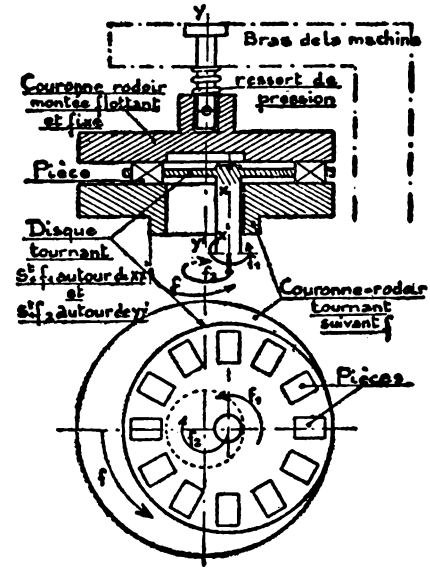


Fig. 70. — Machine de superfinition des surfaces planes.

L'arbre qui porte la cage est animé de deux mouvements de rotation :

- une rotation autour de son axe suivant f_1, dans le même sens que f, mais avec une vitesse moitié moindre ; ainsi, la vitesse relative des surfaces supérieure et inférieure des pièces est la même par rapport aux deux couronnes-rodoirs.
- une rotation f_2 autour de l'axe des couronnes. Ainsi chaque pièce a un mouvement épicycloïdal par rapport à yy' et balaye toute la surface de la couronne-rodoir.

Si l'on rode des surfaces planes, les axes des pièces peuvent, sans inconvénient, être disposés suivant des rayons du disque d'entraînement.

Pour le rodage de cylindres, l'axe des pièces est disposé obliquement par rapport à un rayon atteignant l'une de ses extrémités. Le disque d'entraînement n'est plus animé

du mouvement f_1 ; il est fou sur son axe et ce sont les pièces, cylindriques, mises en rotation par le plateau inférieur, qui entraînent le disque (*fig.* 71).

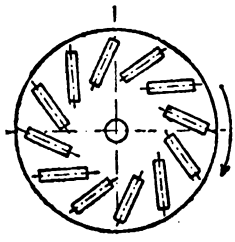


Fig. 71. — Machine de superfinition des pièces cylindriques.

Précision atteinte.

On peut obtenir un état de surface où la profondeur moyenne des sillons est de l'ordre de 0,3 micron en employant des poudres abrasives d'indice 500.

Pour atteindre le glaçage des surfaces, on recourt aux poudres d'indice 800, et la profondeur moyenne des stries est de l'ordre de 0,1 à 0,2 micron.

SUPERFINITION

Le rodage mécanique, que l'on désignait à son origine par « superfinition », s'est modifié pour donner naissance à une nouvelle technique qui s'est approprié ce terme.

La superfinition, comme le rodage, a pour objet de supprimer les crêtes des sillons laissés par la rectification, et la couche de Bailby. L'outil est constitué par des pierres abrasives de grande finesse pouvant atteindre l'indice 800. On applique surtout cette technique au parachèvement des surfaces cylindriques extérieures. Après un véritable engouement pour ce procédé, il semble qu'on l'emploie moins depuis que les meules ont fait de grands progrès et que des résultats comparables peuvent être obtenus par rectification.

Principe.

Les pierres, taillées au rayon de la pièce, sont disposées parallèlement à l'axe de celle-ci (*fig.* 72). La pression au contact a une valeur comprise entre 1 et 5 kg/cm². La pièce est en mouvement de rotation continu (en général), à la vitesse de 25 m/mn environ. Le rodoir est animé d'un mouvement rapide de translation alternée parallèlement à l'axe de la pièce : fréquence 1 000 à 2 000 coups par minute ; le déplacement est faible : 3 à 5 mm en ébauche, et 1 à 2 mm en finition.

Au début, la pression ne s'exerce que sur le sommet des aspérités qui s'usent vite ; la surface pressée croît donc rapidement et la pression est rapidement insuffisante pour maintenir la coupe ; l'opération de rodage se stoppe d'elle-même.

La lubrification doit être très abondante.

Réalisations.

On trouve des appareils de superfinition qui peuvent se monter sur un tour parallèle à la place de la tourelle porte-outils. La pièce est alors montée entre pointes ou en l'air selon sa forme, puis mise en rotation (*fig.* 73-74).

Il existe également des machines spéciales, analogues aux machines à rectifier, pour les

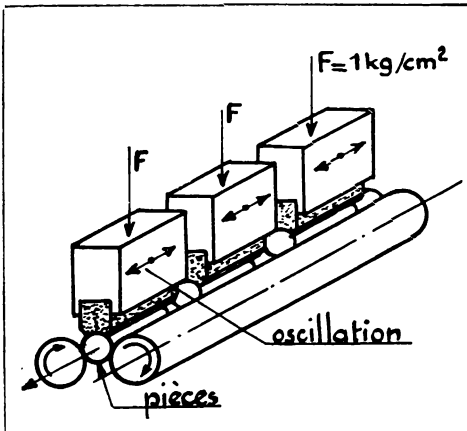


Fig. 72. — Machine à superfinir Centerless.

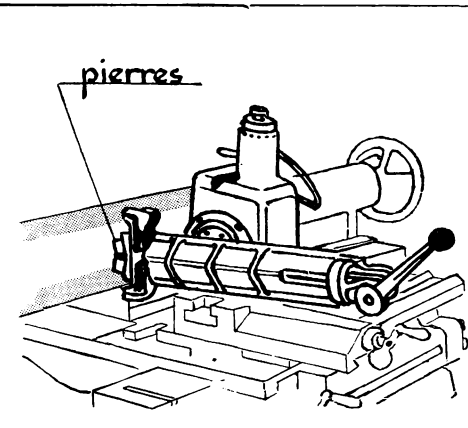


Fig. 73. — Tête de superfinition Gisholt.

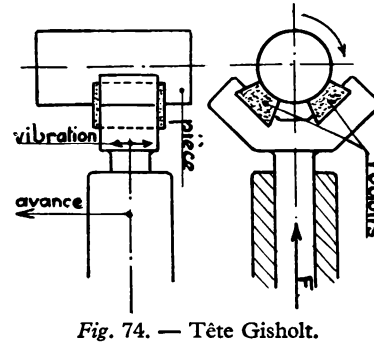


Fig. 74. — Tête Gisholt.

surfaces extérieures ou pour les surfaces intérieures. La tête de finition prend sur ces machines la place de la poupée porte-meule.

D'autres machines dérivent de la machine à rectifier Centerless : l'entraînement des pièces est donné par des rouleaux.

Résultats.

Le glaçage des surfaces obtenues correspond à des stries de 0,1 à 0,2 micron de profondeur.

Les erreurs géométriques de l'usinage précédent sont conservées, l'épaisseur de métal enlevé étant inférieure à 3 microns.

Contrôle du rodage et de la superfinition.

Le contrôle du travail comprend :

a) avant le début de l'usinage, la vérification des formes géométriques. Il faut se rappeler qu'une opération de rodage ne peut pas corriger des erreurs de forme importantes et que, à ce point de vue, la pièce doit donner toute satisfaction avant ces opérations de parachèvement. Les opérations de rectification qui précèdent doivent donc être soignées.

b) Pendant et après le travail : vérification des états de surface, à l'aide des appareils perfectionnés et récemment vulgarisés : intégrateur pneumatique Nicolau, analyseur Brush ou Taly-Surf, interféromètre.

Commande numérique

La commande numérique, exigeant la création d'objets remplissant des fonctions technologiques variées mettant en œuvre des procédés de création très divers (usinage mécanique, déformations plastiques, assemblages par collage, couture, etc.) tend à se généraliser.

Les techniciens et ouvriers de l'industrie doivent être informés de ces techniques nouvelles. Nous avons rédigé à leur intention une étude sommaire aussi précise que possible, afin qu'ils soient capables de comprendre les machines qu'ils auront à utiliser. Nous conseillons au lecteur de ce chapitre de lire très attentivement les définitions qui sont données au cours de l'étude qui est proposée, afin que les exemples traités apparaissent faciles à comprendre.

Bien entendu, cette étude devra être illustrée par l'utilisation de matériel (petites machines à calculer — type ordinateur —, terminaux d'ordinateur, petites machines à commande numérique).

NOTIONS SUR L'ORDINATEUR

A. DÉFINITIONS

A1. La machine

L'ordinateur est une machine à calculer qui effectue les opérations élémentaires avec une très grande rapidité (de l'ordre de plusieurs milliers à plusieurs millions par seconde). Il peut, grâce à son appareillage électronique, effectuer un certain nombre de traitements simples, tels que :

— opérations arithmétiques élémentaires,
— comparaison de nombres,
— lecture de caractères alphabétiques et numériques...

A2. L'informatique

Étant donnée la grande rapidité de calcul, on peut donner à la machine un volume d'informations très important. L'étude des principes et des méthodes de traitement de ces informations a reçu le nom d'**informatique.** L'outil de travail de l'informatique est l'ordinateur.

Cette notion d'outil doit rester attachée à cet ordinateur, car une machine, aussi perfectionnée soit-elle, ne peut exécuter que des fonctions répétitives « programmées » par l'homme. Malgré l'aspect spectaculaire des résultats qu'il donne, l'ordinateur ne peut raisonner, analyser, décider ; il suit servilement les indications qui lui sont données sous forme de « programme ».

L'utilisateur garde donc le choix de l'emploi, il a l'initiative de la programmation.

B. PRÉSENTATION

Les préliminaires ci-dessus font apparaître l'existence de deux parties :

1° **Les équipements électroniques** (l'ensemble est appelé **MATÉRIEL**).

2° **Les programmes (ou langages)** : ils permettent l'utilisation de ce matériel. Ils ont reçu le nom de **LOGICIELS.**

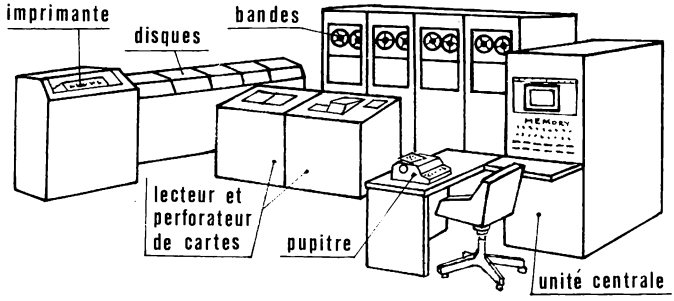
B1. Le matériel (*fig.* 1 : vue d'ensemble ; *fig.* 2 : schéma)

Il se compose des parties suivantes :

— **L'UNITÉ CENTRALE** qui comprend trois éléments : la mémoire centrale, l'unité de calcul, l'unité de commande.

— **DES MÉMOIRES PÉRIPHÉRIQUES** : bandes magnétiques, disques magnétiques.

— **DES ORGANES D'ENTRÉE-SORTIE DES INFORMATIONS :**



- **organes d'entrée :** claviers de machine à écrire, lecteurs de cartes ou lecteurs de rubans perforés ;
- **organes de sortie :** imprimantes, perforateurs de cartes ou perforateurs de rubans, écrans cathodiques.

Fig. 1. — **Vue d'ensemble du matériel.**

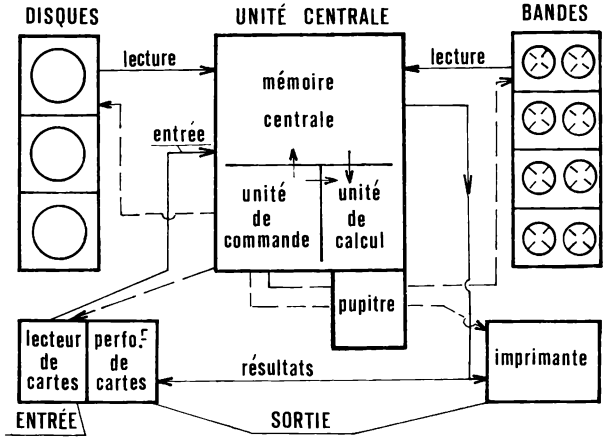


Fig. 2. — **Schéma du matériel.** Relations entre les composants.

B 11. L'UNITÉ CENTRALE

B 111. La mémoire centrale

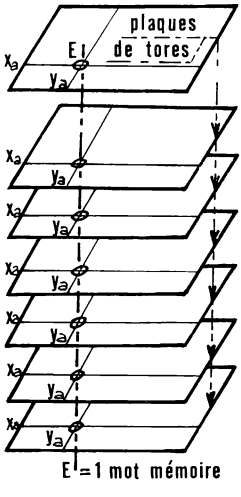


Fig. 3. — **Schéma d'ensemble de la mémoire.** E : ensemble des tores sur une verticale d'adresse X_a, Y_a.

1° **Rôle :** La mémoire centrale stocke les informations dont on a besoin pour le traitement.

2° **Constitution :** Les mémoires sont des bascules bistables (tores de ferrite, cristaux, films minces, semi-conducteurs sous forme intégrée...).

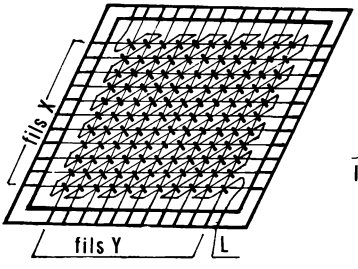


Fig. 4. — Plaque de tores et réseau de fils.

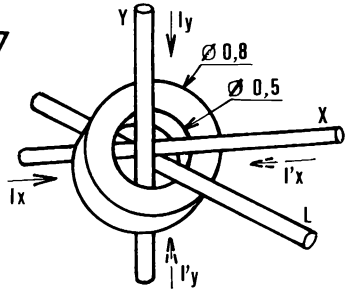


Fig. 5. — Tore de ferrite et fils qui le traversent.

3° **Fonctionnement avec des tores de ferrite :** La mémoire se compose, schématiquement, d'une série de plaques superposées (*fig.* 3). Chaque plaque porte un réseau de fils croisés (*fig.* 4). A l'intersection de deux fils X, Y, il y a un tore de ferrite (*fig.* 5). Un troisième fil L traverse les tores parallèlement à la diagonale de la plaque.

Enregistrement d'une information

Quand on fait passer un courant déterminé Ix et Iy sur deux fils X et Y (*fig.* 5), le champ résultant sur le tore qui est au croisement des deux fils magnétise ce tore. Il y a enregistrement. On dit que le tore passe de l'état 0 à l'état 1 (code binaire).

Nota. — Le courant Ix est insuffisant, à lui seul, pour changer l'état des tores qui sont sur la ligne X ; même chose pour Iy sur la ligne Y.

Lecture d'une information

Si on fait passer les courants I'x et I'y dans les fils X et Y en sens inverse du sens précédent, le tore est démagnétisé (retour à l'état 0). Cette démagnétisation a pour conséquence la création d'une impulsion électrique dans le fil L, ce qui permet la lecture de l'information. Dans ces conditions, l'information est détruite, mais l'ordinateur est conçu pour qu'elle soit automatiquement régénérée.

4° **Mot mémoire. Adresse :** Un seul tore de ferrite ne permet pas de distinguer les caractères alphabétiques ou numériques. Pour que cette distinction soit possible, il faut une combinaison de tores magnétisés ou non, spécifique de ces caractères ou de ces mots.
C'est pourquoi une information complète (ou **mot mémoire**) est fournie par l'ensemble des tores situés sur une même verticale (*fig.* 3). Sa position sur les plaques est donnée par Xa et Ya et est appelée **adresse** du mot en mémoire.

5° **Caractéristiques d'un ordinateur :** Elles sont données par sa taille mémoire : **nombre de mots et longueur des mots.**

Nombre de mots

Ce nombre étant de plusieurs milliers, on a défini des blocs de 1 024 mots. Un tel bloc est défini par la lettre K. On trouve des ordinateurs de 4K, 8K, 16K (mini-ordinateurs) ; 32K, 64K, 128K (ordinateurs moyens) ; 256K, 512K (gros ordinateurs).

Longueur du mot

Elle est donnée par le nombre de tores qui l'identifie (nombre de tores de la verticale *fig.* 3). Chaque tore correspond à un caractère binaire. On l'appelle aussi *bit* (contraction du mot anglais *BInary digiT*).
Suivant les ordinateurs, on aura des mots de 8 bits (appelé *octet*), 16, 32, 48, 60 bits (ces derniers sont utilisés pour le calcul scientifique).

Exemple de désignation d'un ordinateur

32K mots de 16 bits : en se reportant au schéma de la *fig.* 3, un tel ordinateur aurait 32 × 1 024 tores sur chaque plaque et il y aurait 16 plaques superposées.

B 112. L'unité de calcul

Elle assure les calculs élémentaires : addition, soustraction, multiplication. Suivant le type d'ordinateur, il faut quelques microsecondes (1 μs = 10^{-6}s) à quelques nanosecondes (1 ns = 10^{-9}s) pour effectuer une opération.

Cette unité possède un registre important, appelé **accumulateur,** dans lequel se font les différentes opérations entre variables. C'est dans l'accumulateur que se trouve le résultat de ces opérations (voir paragraphe D).

B 113. L'unité de commande

Cette unité possède une horloge qui va déclencher, d'une façon périodique, chaque étape élémentaire intervenant dans l'exécution d'une instruction.
Ce déclenchement se fait toutes les *m* microsecondes ou les *n* nanosecondes signalées au paragraphe B112.

Cette unité possède en outre deux registres :

1° **Un compteur d'instructions (ou compteur ordinal).**

Il contient le numéro de la prochaine instruction à réaliser.

2° **Un registre d'instruction (ou d'échange, ou décodeur).**

Il contient l'instruction à analyser pour l'exécuter (il réalise une reconnaissance des codes de cette instruction (ou décodage) et il effectue les tâches demandées dans cette instruction).

Nous donnerons, après l'étude des langages, un exemple d'utilisation de ces éléments dans le traitement d'un programme simple (paragraphe D).

B 12. MÉMOIRES PÉRIPHÉRIQUES

Elles stockent l'information sous une forme directement assimilable par la machine, quand cette information n'a pas lieu d'être en mémoire centrale. (*Exemple :* fichier du personnel, fichiers stocks, fichiers ordonnancement...)

B 121. Bandes magnétiques

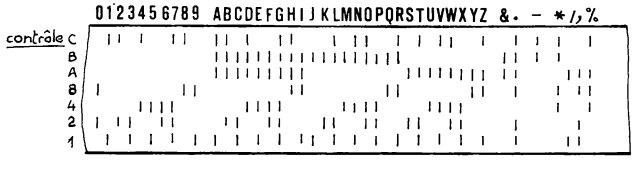


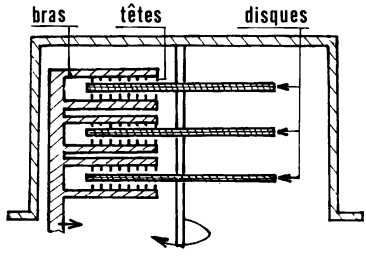
Fig. 6. — Bande magnétique 7 pistes; codages des caractères.

Ce sont de fines pellicules de matière plastique recouvertes d'une couche de matière magnétisable. Un caractère alphanumérique est représenté par un groupement de points magnétisés (*exemple : fig.* 6). On peut stocker de 80 à 400 caractères par cm.

Temps de lecture d'un caractère : de 10 à 100 μs environ.

Les informations sont lues les unes après les autres, sans retour en arrière. C'est une lecture dite à « accès séquentiel ».

B 122. Disques magnétiques



Ce sont des disques métalliques de ϕ 400 mm, recouverts de matière magnétique sur les deux faces. Par face, il y a 200 pistes concentriques (avec 20 000 caractères par piste environ). L'information est répartie par secteur (ou portion de piste) avec une adresse permettant d'y accéder (numéro du disque, numéro de la face, numéro de la piste, numéro du secteur). C'est l'accès direct. **Temps de lecture d'un caractère :** 5 à 10 μs.

Fig. 7. — Groupement de disques avec bras et têtes de lecture (têtes représentées par les pointes).

Plusieurs disques sont généralement regroupés pour former une unité de mémoire (*fig.* 7). La lecture est faite par des têtes magnétiques montées sur des bras mobiles. Chaque tête exploite plusieurs pistes du disque.

B 13. ORGANES D'ENTRÉE-SORTIE

B 131. Entrée : lecteur de cartes

La carte perforée est décrite dans le chapitre commande numérique (programmation).

La lecture est faite par cellules photo-électriques, colonne par colonne (vitesse 500 à 600 cartes par minute).

B. 132. Sortie

Perforateur de cartes

Les perforations sont réalisées par des poinçons en acier, animés de mouvements alternatifs (cadence : 250 à 500 perforations par minute). Les deux fonctions lecture et perforation sont de plus en plus groupées en une même machine (lecteur-perforateur).

Imprimante

C'est une machine à écrire possédant un système d'impression automatique (par marteaux, aiguilles, ou tête porte-caractères). La commande des éléments d'impression se fait par circuits électroniques en liaison avec les circuits de l'unité centrale de la machine.

Cette impression peut se faire caractère par caractère (10 à 15 car/s) ou ligne par ligne (150 à 1 500 lignes/minute).

B. 133. Entrée-sortie

Pupitre

Machine à écrire qui permet de converser avec l'ordinateur : entrée à l'aide d'un clavier et réponse de l'ordinateur par impression sur une feuille.

Performance : 5 à 15 caractères/s.

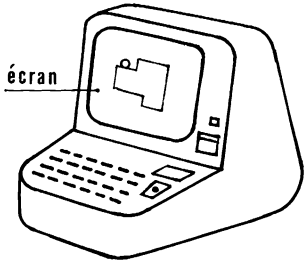


Fig. 8. — Console avec écran cathodique.

Terminaux (ou consoles) : *fig.* 8.

Sortes de pupitres pour converser à distance avec l'ordinateur (traitement à distance).

Écrans cathodiques

Ce sont des écrans associés à un clavier (écrans comparables aux écrans de télévision).

On peut entrer des données par clavier ou par crayon électronique sur l'écran. On peut sortir des résultats sur écran ; on peut y visualiser des trajets d'outils, des tracés de pièces ou de surfaces.

C. LES PROGRAMMES : LES LOGICIELS

On appelle **programmation** la définition, dans un langage compréhensible par l'ordinateur, de la suite logique des opérations à effectuer.

C1. Programmation en langage machine

L'ordinateur ne comprend que des chiffres exprimés en binaire, soit avec des 0 et des 1 (voir paragraphe B111). Cette forme binaire est très difficile à manipuler par l'homme pour donner les instructions à la machine (voie 4, *fig.* 9). Pour faciliter certaines communications, la forme binaire est convertie en octal (système à base 8) ou en hexadécimal (système à base 16).

C2. Programmation avec formes mnémoniques : assembleur

Pour remédier aux inconvénients ci-dessus, on a substitué à des séquences binaires des codes mnémoniques plus faciles à retenir et à comprendre.

Exemple : ADA B (AD → additionner ; A → accumulateur A ; B → valeur à ajouter au contenu de l'accumulateur A).

Ces codes sont traduits en binaire dans les machines. Le langage de traduction est appelé « langage d'assemblage » ou « assembleur ».

Pour appliquer ces langages, le programmeur doit penser le problème en opérations élémentaires ; il doit connaître la machine sur laquelle il va traiter ce problème (voie 3, *fig.* 9 et exemple paragraphe C5).

C3. Programmation en langage évolué

Pour faciliter encore plus la programmation, on a construit des langages évolués, moins complexes que le langage assembleur, et qui se rapprochent du langage humain. Citons, par exemple :

— Le COBOL (pour la gestion).
— Le FORTRAN (pour les calculs scientifiques).

Ces langages sont traduits en langage machine par un traducteur appelé **compilateur,** qui n'est autre que le programme spécial de la machine (voie 2, *fig.* 9 et exemple paragraphe C5).

On a créé des langages propres à la commande numérique qui, selon les compilateurs, sont traduits en FORTRAN (IFAPT voie 1*a*, *fig.* 9) ou en « assembleur » (ADAPT voie 1*b*, *fig.* 9).

C4. Tableau des communications avec l'ordinateur

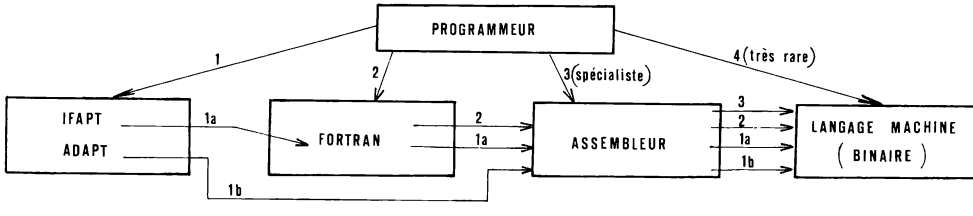
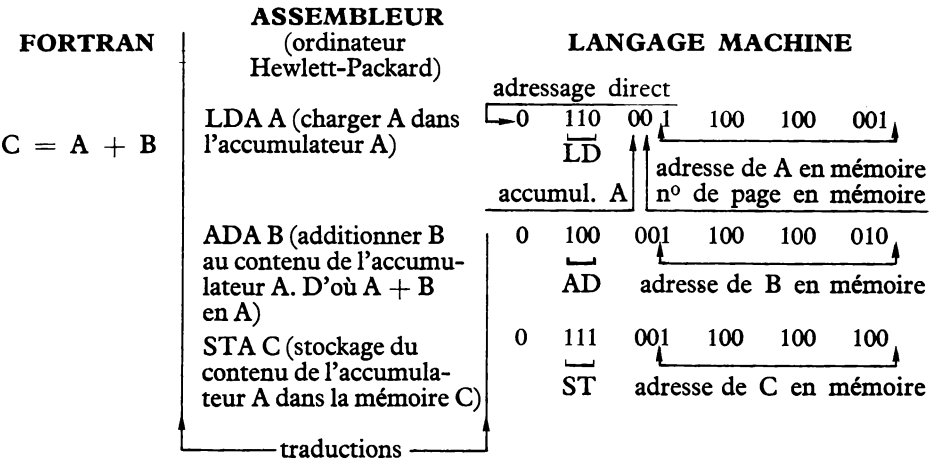


Fig. 9. — Différentes possibilités de communication entre l'homme et l'ordinateur.

C5. Exemple d'application

Le tableau ci-après montre ce que devrait écrire, en assembleur ou en langage machine, un programmeur qui veut faire le calcul C = A + B (qu'il écrira ainsi en langage FORTRAN) :



D. EXÉCUTION D'UN PROGRAMME SIMPLE

Soit à traiter le programme suivant, écrit en langage BASIC (langage de calcul) :

10	READ A, B	signification	10 LIRE A, B
20	LET C = A + B		20 FAIRE C = A + B
30	PRINT C		30 IMPRIMER C
40	DATA 3.1, 4.5		40 DONNÉES 3,1 et 4,5
50	END		50 FIN

Chaque ligne s'appelle une **instruction.** Le traitement de ce programme va être effectué en deux temps :

D1. Entrée et traduction en langage machine

Cette phase s'appelle la **compilation.** Elle comprend :

1° Le décodage de la syntaxe de l'instruction.

Cette opération consiste en une vérification de l'orthographe et de la grammaire, avec émission de messages d'erreurs s'il y a lieu.

2° Traduction en langage machine.

L'instruction 20 FAIRE C = A + B deviendra :

Charger A dans l'accumulateur
Additionner B au contenu de l'accumulateur
Stocker le résultat dans la mémoire C

] voir paragraphe C5

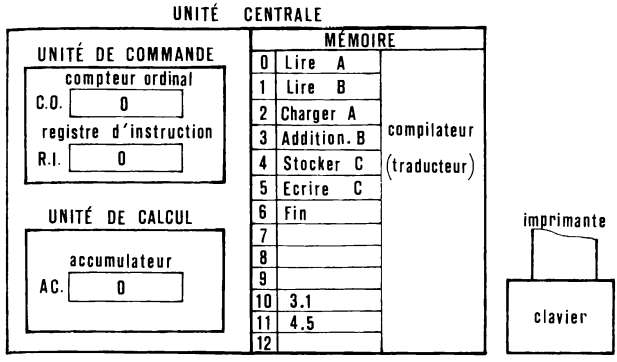


Fig. 10. — Disposition du programme en mémoire.

Toutes ces instructions sont écrites en binaire dans la mémoire. Nous conserverons les écritures ci-dessus pour simplifier la description du traitement.

3° Disposition en mémoire. Repérage.

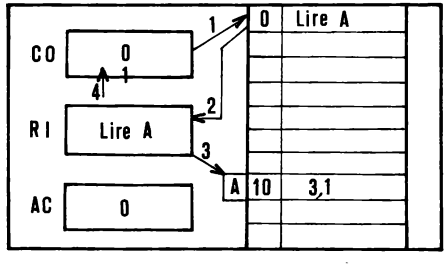
L'ordinateur va fixer une place en mémoire à chaque instruction, à chaque variable, aux valeurs de ces variables (*fig.* 10).

Après lecture de l'instruction FIN, le compteur ordinal est à 0.

D2. Exécution

Lorsque l'utilisateur va donner le départ pour le traitement, l'ordinateur va opérer de la façon suivante :

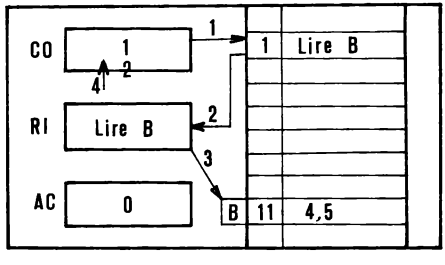
1re Instruction



ces numéros correspondent aux flèches

1. Recherche de l'instruction 0 (valeur du C.O.).
2. On met dans le R.I. l'instruction dont l'adresse est 0 (valeur du C.O.). LIRE A vient dans R.I.
3. A est identifié et prend la valeur 3,1.
4. Le C.O. se met à la valeur 1.

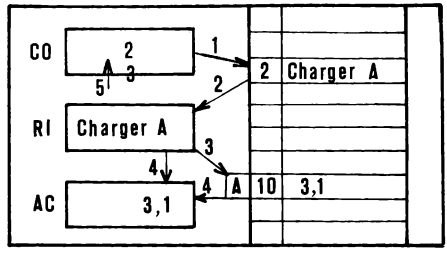
2e Instruction



1. Recherche de l'instruction 1.
2. LIRE B vient dans le R.I.
3. B est identifié et prend la valeur 4,5.
4. Le C.O. se met à 2.

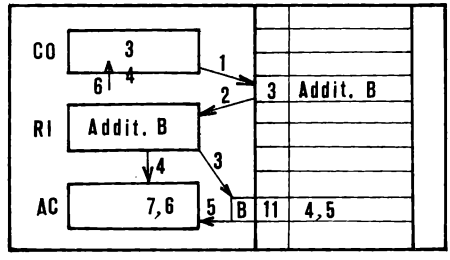
Fig. 11 (1-2-3-4-5-6). — Opérations effectuées lors du traitement des 7 instructions du programme enregistré à la *fig.* 10.

3e Instruction



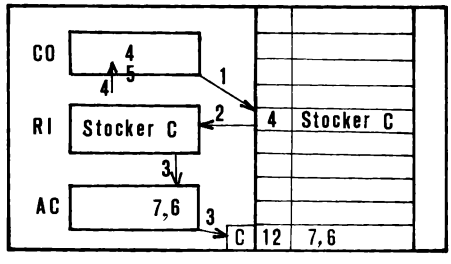
1. Recherche de l'instruction 2.
2. « Charger A » vient dans le R.I.
3. Recherche de A dans la mémoire.
4. Transfert de la valeur de A dans l'accu.
5. Le C.O. passe à 3.

4e Instruction



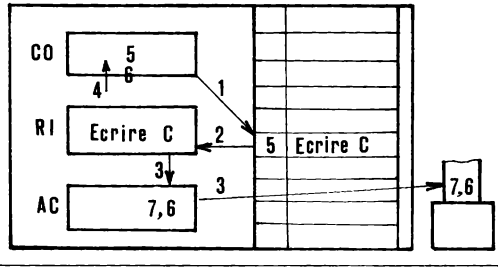
1. Recherche de l'instruction 3.
2. « ADDIT B » vient dans le R.I.
3. Recherche de B en mémoire.
4. Ouverture des circuits d'addition.
5. La valeur de B est additionnée à la valeur qui était dans l'accu (donc A). Le résultat reste dans l'accu.
6. Le C.O. passe à 4.

5e Instruction



1. Recherche de l'instruction 4.
2. « Stocker C » vient dans le R.I.
3. 7,6 va de l'accu à la mémoire C.
4. Le C.O. se met à 5.

6e Instruction



1. Recherche de l'instruction 5.
2. « Écrire C » vient dans le R.I.
3. Un signal est envoyé à la télétype pour imprimer la valeur de C.
4. Le C.O. passe à 6.

7e Instruction : Lecture de FIN ; le programme s'arrête.

E. MODES D'EXPLOITATION

E1. Travail en temps réel

Il faut que l'information soit traitée au moment où elle prend naissance et il faut renvoyer aussitôt les résultats obtenus.

Ces résultats peuvent agir sur des mécanismes régulateurs (commande directe de hauts fourneaux, échos radar, capsules spatiales, machines à papier...) ou ils peuvent être communiqués à l'homme pour qu'il prenne une décision immédiate (réservation des places d'avions (*fig.* 12) ; réservation de couchettes ; opérations bancaires...).

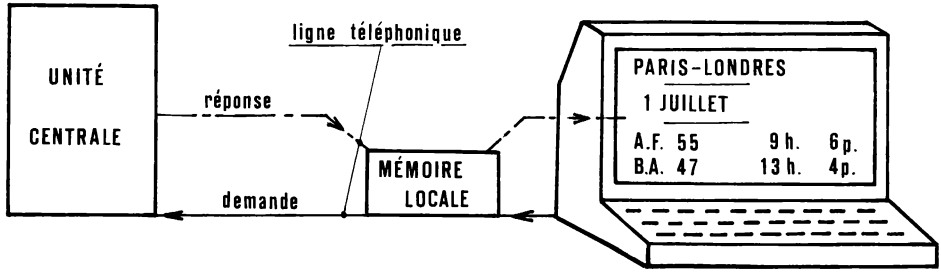


Fig. 12. — **Réservation.** L'ordinateur est au siège central et l'agence utilise un terminal avec écran (affichage des vols, heures, nombre de places).

E2. Traitement par lots

On groupe les données pour les traiter avant une date déterminée. On les traite à loisir, le moment venu, suivant une séquence déterminée (paye, facturation, ordonnancement, calculs scientifiques, commande numérique).

E3. Multiprogrammation

L'unité centrale fait son travail en 1 μs, les périphériques en 10 μs (disques) ou 100 μs (bandes). L'unité centrale est donc arrêtée pendant la majorité du temps. On va utiliser ces moments de disponibilité pour traiter d'autres programmes qui auront été placés en mémoire centrale. Il faut de gros ordinateurs (256 à 512K). L'utilisation la plus caractéristique est le travail en temps partagé (*fig.* 13).

E4. Travail en temps partagé (ou time-sharing)

(*fig.* 13)

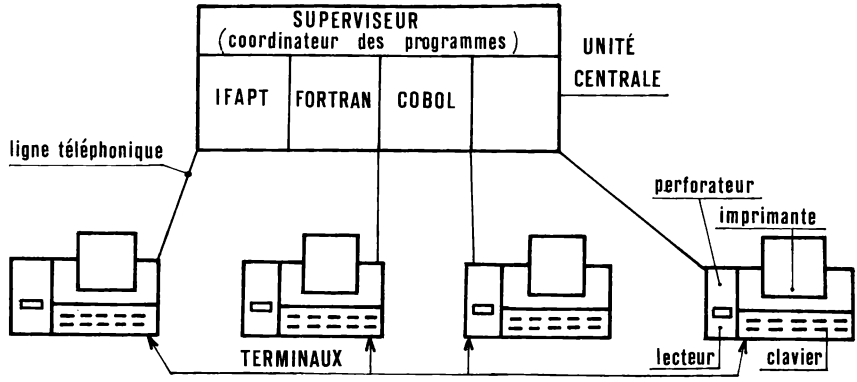


Fig. 13. — Connections pour le travail en temps partagé.

C'est l'utilisation d'un ordinateur par un grand nombre d'utilisateurs (travail à distance). Chacun de ces utilisateurs possède un terminal et tous peuvent être reliés simultanément à la machine. Le programmeur a l'impression qu'il dispose de la machine pour lui tout seul. En réalité, l'ordinateur passe d'un programme à l'autre en travaillant quelques fractions de seconde sur chacun d'eux.

LES MICRO-PROCESSEURS

A. DÉFINITION

Ce sont des appareils composés de circuits intégrés qui peuvent fonctionner grâce à un programme d'instructions. La réalisation des circuits est telle que l'on peut donner à cet appareil une multitude d'applications ; il suffit d'introduire un programme spécifique, comme on le ferait dans un très petit ordinateur (micro-ordinateur).

Bien qu'ils comportent des éléments comparables à ceux d'un ordinateur (accumulateur, unité arithmétique et logique, décodeur d'instructions, compteur ordinal), les micro-processeurs ont des dimensions très petites (environ celle de deux morceaux de sucre mis bout à bout).

B. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

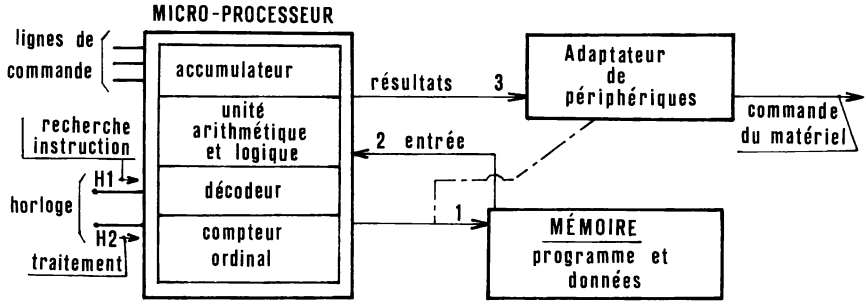


Fig. 14. — **Micro-processeur** : Constitution. Principe de fonctionnement.

A : Entrée du programme en mémoire (programme écrit sous forme « assembleur »)

B : Mise en route :

1° Le micro-processeur émet une adresse, toujours la même, pour débuter le travail (sens 1). Il reçoit l'instruction correspondante en provenance de la mémoire (sens 2) (durée de ces opérations : quelques centaines de nanosecondes, réglées par l'horloge, sens H_1).

2° Le micro-processeur exécute les opérations et les transferts commandés par l'instruction qu'il a reçue (durée identique à la précédente réglée par l'horloge, sens H_2).

Ce cycle en deux parties recommencera jusqu'à la fin du traitement :

1° Envoi d'une adresse, sens 1; réception de l'instruction, sens 2.

2° Exécution du traitement et sortie des résultats, sens 3.

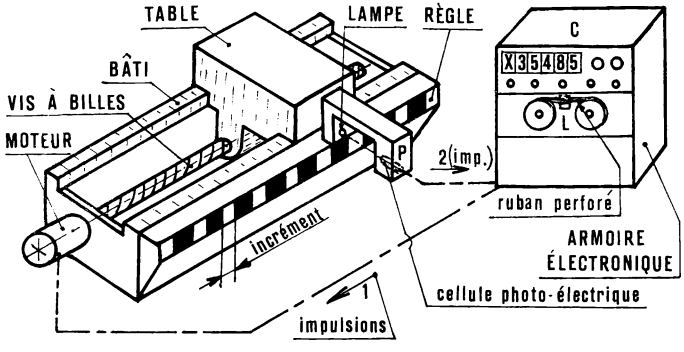
C. APPLICATIONS

Elles apparaissent nombreuses et sont appelées à bouleverser la commande des matériels : commande des machines-outils, commande de moteurs, programmateurs de machines à laver, commande de certaines fonctions de l'automobile, signaux d'alarme, commande d'appareils de contrôle (triage, multicotes).

MACHINE A COMMANDE NUMÉRIQUE

A. PRINCIPES

A1. Définition (*fig.* 1)



La machine à commande numérique est conçue pour réaliser automatiquement le déplacement des tables et la commande des outils, à partir d'informations numériques enregistrées sur un ruban perforé. Ce ruban est introduit dans une armoire électronique associée à la machine-outil.

Fig. 1. — Système de commande numérique sur une direction de travail.

A2. Mise en œuvre de la machine

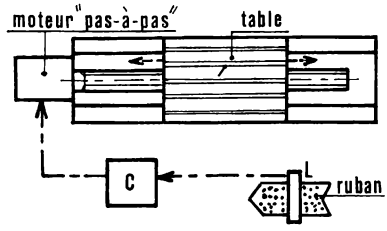
1° Établissement du ruban perforé par le bureau des méthodes (*voir* § C et F).
2° Préparation de la machine à l'atelier (préréglage des outils, références sur porte-pièce).
3° Mise en place du ruban dans l'armoire.
4° Mise en marche. (Les **ordres de mouvement** et les **conditions technologiques** qui figurent dans le ruban permettent le déroulement de l'usinage ; le compagnon surveille la machine.)

A3. Processus de commande des mouvements

A 31. DANS LE CAS D'UN SYSTÈME DIT « A BOUCLE FERMÉE » (*fig.* 1)

— En L, l'armoire électronique lit sur le ruban les informations relatives à **UN** déplacement et à **UN** usinage.
— En C, elle compare l'ordonnée lue, XN, à l'ordonnée précédente, XA. Si XN $\neq$ XA, un ordre de mouvement est donné au moteur d'entraînement de la vis (circuit 1). La table se déplace.
— En P, le capteur de position donne au comparateur C la position de la table à tout instant (circuit 2). Dans le cas du système de mesure choisi pour la *figure* 1, les impulsions venant de la cellule photo-électrique sont décomptées, en C, du nombre d'impulsions traduisant la cote à atteindre.
— Un nouvel ordre de mouvement est donné au moteur tant que la valeur du décompteur d'impulsions est différente de 0.
— A la valeur 0, la table sera arrêtée.

A 32. DANS LE CAS D'UN SYSTÈME DIT A « BOUCLE OUVERTE » (*fig.* 2)



— Lecture du ruban (ordonnée XN).
— Calcul du nombre d'impulsions à donner au moteur pas-à-pas pour déplacer la table. (Le moteur pas-à-pas tourne d'un angle déterminé, à chaque impulsion, provoquant le déplacement de la table d'une valeur *d*.)

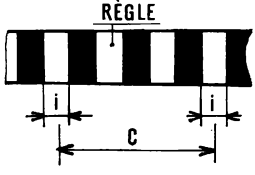
Fig. 2. — Système à boucle ouverte.

Nombre d'impulsions I à envoyer au moteur $= (XN - XA)/d$.
Quand les impulsions I auront été envoyées au moteur, la table va s'arrêter.

B. PRÉCISION DE POSITIONNEMENT

Le constructeur d'une machine à commande numérique donne deux précisions :
— la précision de répétition (ou fidélité) ;
— la précision de positionnement.

B1. Précision de répétition (systèmes à boucle fermée)



Chaque largeur du trait noir ou blanc de la règle est appelée **incrément** (i). La machine n'est pas maître de la position à l'intérieur de l'incrément.
Il y a donc une incertitude i à l'origine et à l'extrémité d'une cote (*fig.* 3).
On ne peut donc pas réaliser mieux que $C \pm i$ ($\simeq C \pm 0{,}01$).

Fig. 3. — Cote à réaliser.

B2. Précision de positionnement

D'autres défauts peuvent s'ajouter à cette incertitude (erreurs de division sur la règle, dilatations, déformations).
C'est la raison pour laquelle le constructeur donne une deuxième valeur de précision, dite *précision de positionnement*. Cette valeur correspond aux écarts maxi que l'on peut avoir sur les cotes réalisées. Elle est environ le double de la fidélité, soit $\pm 2\,i$.

Conséquences

— C'est la valeur qu'il faut considérer pour décider de l'usinage d'une pièce sur la machine. Si les IT des cotes calculées sont inférieurs à $\pm 2\,i$, il faut changer de machine.
— Toutes les cotes seront obtenues avec des tolérances $\pm 2\,i$ environ. On ne met donc, sur le programme, que la cote nominale moyenne.

— Pour avoir la meilleure précision possible, il faut fabriquer la règle avec l'incrément le plus petit possible. C'est la raison pour laquelle les réalisations pratiques s'orientent vers une définition assez large des traits de la règle (pour des facilités de fabrication), avec contrôle effectif de déplacement très petit.

B3. Systèmes en boucle ouverte

La précision de positionnement va dépendre de la sûreté de fonctionnement du moteur « pas-à-pas » et de la précision de la vis ; d'où le choix de vis à billes dans ces systèmes (précision 0,01 mm sur 200 mm environ), ou le choix de vis Transroll (précision 0,04 mm sur 200 mm environ).

C. INFORMATIONS DONNÉES A LA MACHINE

C1. Bloc d'informations

C'est l'ensemble des instructions données sous forme codée à la machine pour effectuer UN déplacement des tables et un usinage.

Exemple :

N001 G81 X02000 Y01500 Z00800 F620 S710 T01 M13

adresse — mot

Signification :

N001 : numéro d'usinage (de 001 à 999).

G81 : type d'usinage (norme Z68030). G81 permet le perçage à l'avance travail et la remontée du foret à l'avance rapide.

X02000, Y01500 : coordonnées du point où a lieu le perçage.

02000 et 01500 sont les cotes moyennes de X et Y exprimées en centièmes. (Cinq chiffres pour une machine de course inférieure à 1 mètre. Le zéro à gauche du dernier chiffre significatif est obligatoire sur certaines machines. La définition des axes est donnée par la norme Z68020.)

Z00800 : course d'usinage (valeur en centièmes).

F6 [20] : vitesse d'avance de l'outil (200 mm/mn)

S7 [10] : fréquence de rotation de l'outil (1 000 tr/mn)

] norme Z68031.

(6 et 7 sont obtenus en ajoutant 3 au nombre de chiffres entrant dans la valeur de l'avance ou de la fréquence.)

T01 : numéro d'outil (numéro maxi d'après la capacité du magasin à outils prévu sur la machine). Si le changement est manuel, le numéro peut prendre des valeurs importantes ; dans ce cas, une information arrête la machine pour effectuer le remplacement.

M13 (appelée fonction auxiliaire) : définit le sens de rotation de la broche (ici anti-trigonométrique) avec arrosage.

M03 définirait le même sens de rotation sans arrosage.

Remarque importante :

Dans la pratique, il faudra connaître et appliquer strictement les codes choisis par le constructeur d'une machine donnée.

C2. Rédaction du programme (formats)

C 21. FORMAT FIXE (norme Z68033)

Tous les blocs ont le même nombre de mots. Il faut modifier les mots qui ont changé par rapport au bloc précédent, mais il faut répéter ceux qui n'ont pas varié.

Exemple :

N001 G81 X02000 Y00500 Z00800 F620 S710 T01 M13
N002 G81 X02000 Y01500 Z00800 F620 S710 T01 M13

C 22. FORMAT VARIABLE (normes Z68031 et Z68032)

Le premier bloc relatif à un usinage est complet. Les blocs qui suivent ne mentionnent que les mots qui ont été modifiés. Le changement d'outil qui sera effectué par la suite imposera un nouveau bloc complet.

Exemple :

N001	G81	X02000	Y00500	Z00800	F620	S710	T01 M13
N002	perçage		Y01500			changement d'outil	← M06
N003	G84	X02000	Y01500	Z00500	F625	S625	T02 M13
N004	taraudage		Y00500				M06

C3. Ruban perforé

Les caractères des blocs d'informations sont enregistrés sur un ruban de papier sous forme de perforations transversales. Les trous sont répartis sur huit lignes longitudinales (pistes ou canaux). Une neuvième piste (entre la 3e et la 4e) assure l'entraînement du ruban (ligne de trous continus).

C 31. EXEMPLE D'ENREGISTREMENT (code ISO)

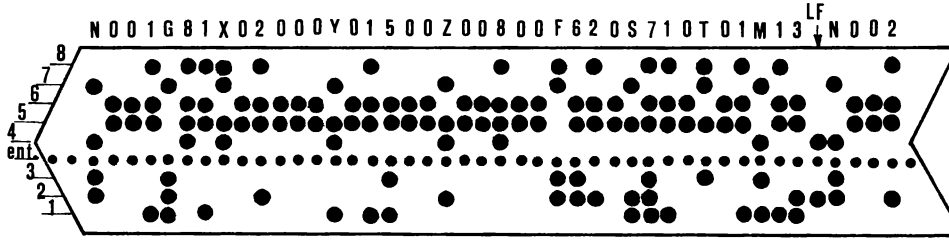


Fig. 4. — Bloc perforé sur ruban

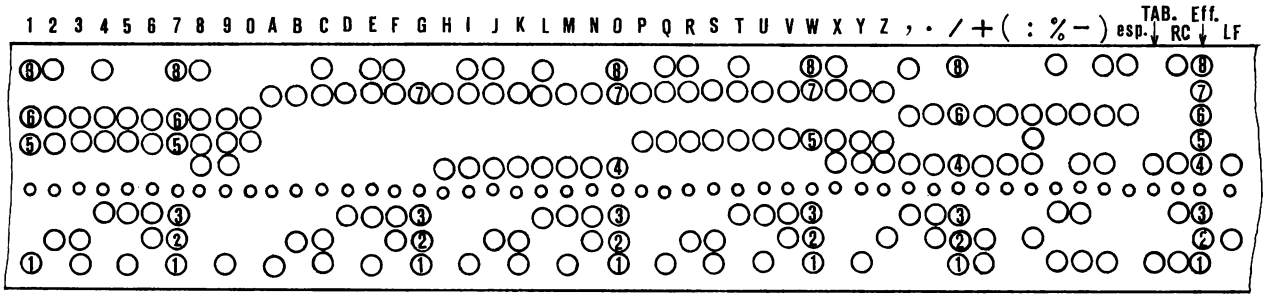


Fig. 5. — **Codage des caractères sur ruban perforé :** code ISO (esp. = espacement; TAB = tabulation; RC = retour chariot; Eff. = effacement (code nul); LF = saut de ligne (fin de bloc).

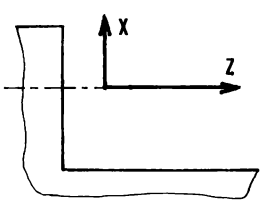


Fig. 6. — Tour; 2 axes.

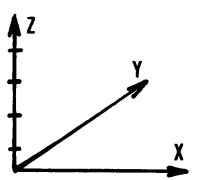


Fig. 7. — Fraiseuse; 2 1/2 axes Z par paliers (1/2 axe).

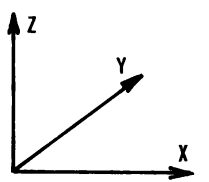


Fig. 8. — Fraiseuse; 3 axes : X, Y, Z.

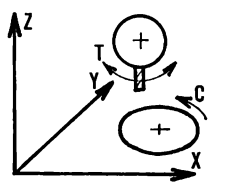


Fig. 9. — Centre d'usinage; 5 axes : X, Y, Z, plateau C, rotation tête porte-outil T.

C 32. CODE ISO (code commun avec les télécommunications)

Sur chaque ligne transversale, il y a un nombre pair de perforations. La piste 8 est appelée **piste de parité.**

C 33. PERFORATION DU RUBAN

Elle est faite sur un perforateur associé à un clavier analogue à celui d'une machine à écrire. Lorsque l'opérateur frappe un caractère du clavier, la perforation est faite automatiquement. Le caractère est toujours imprimé sur un papier.

C 34. VÉRIFICATION DU RUBAN

— Vérification des erreurs de frappe par lecture du ruban.

— Vérification sur table à tracer : la lecture du ruban fait décrire à un stylo le trajet que doit suivre l'outil (travail dans le plan).

— Usinage d'une fausse pièce en polystyrène expansé (travail dans l'espace et vérification des approches rapides de l'outil).

D. POSSIBILITÉS DE TRAVAIL DES MACHINES A COMMANDE NUMÉRIQUE

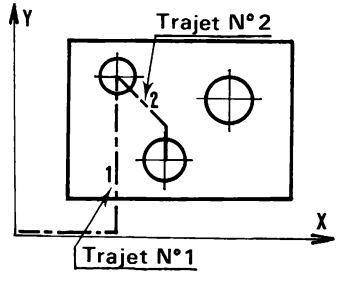
D1. Notion d'axes

Les possibilités de travail d'une machine à commande numérique s'expriment en nombre d'axes de travail (*fig.* 6 à 9).

On appelle **axe** la possibilité de travail dans une direction avec contrôle numérique continu.

On appelle **demi-axe** une direction dans laquelle l'avance n'est pas contrôlable numériquement. On ne peut se situer dans cette direction que par paliers (contrôlés par pistes ou cames) ou par indexations (plateaux circulaires ou diviseurs).

D2. Machines travaillant en « point-à-point » (2 à 3 axes)



On ne peut pas usiner pendant le déplacement des tables ; on ne peut travailler que lorsque la position est atteinte (perçage, lamage, alésage, taraudage).

Trajets (*fig.* 10) :

1 : un bloc définit le déplacement X, un deuxième bloc définit Y.

2 : X et Y sont dans le même bloc.

Fig. 10. — Travail en « point-à-point ».

D3. Machines travaillant en paraxial (coupe parallèle aux axes)

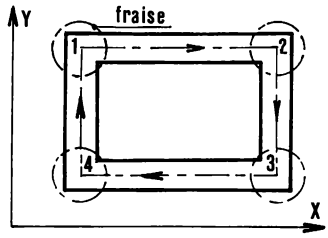


Fig. 11. — Fraisage d'une semelle.

— On peut usiner pendant le déplacement parallèle aux axes (tournage, fraisage, alésage).

— On peut effectuer du « point-à-point ».

— Machines 2 à 3 axes.

Fig. 11 : Description usinage.

1 bloc de mise en position en 1 ; 1 bloc pour le trajet 1-2 ; 1 bloc pour 2-3 ; 1 bloc pour 3-4 ; 1 bloc pour 4-1 ; 1 bloc de dégagement.

D4. Machines travaillant en contournage plan (2 à 3 axes)

L'outil doit décrire une courbe quelconque.

D 41. MACHINES SANS INTERPOLATEUR (sans calculateur intégré à l'armoire)

Il est nécessaire de décomposer le parcours de l'outil en petits segments de droite successifs et parallèles aux axes (Δx et Δy sont calculés d'après la crête C que l'on désire entre deux positions de fraise : *fig.* 12).

Droite

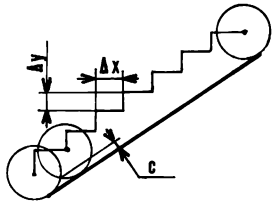


Fig. 12. — Usinage d'une droite inclinée.

Cercle

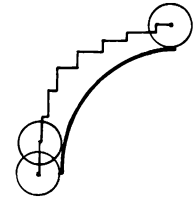


Fig. 13. — Usinage d'un quart de cercle.

Courbe quelconque

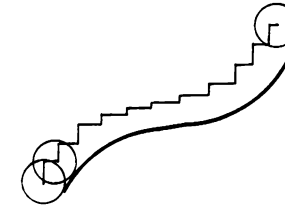


Fig. 14. — Usinage d'une courbe quelconque.

Inconvénients :

— Calcul d'un très grand nombre de points, et risques d'erreurs importants (on peut faire exécuter le calcul par un ordinateur, en dehors de la machine, grâce à un programme mathématique écrit en BASIC ou en FORTRAN).

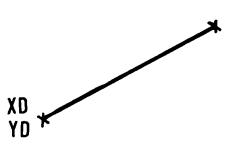
— Le programme est très long (1 bloc pour chaque Δx et 1 bloc pour chaque Δy) et le ruban perforé plus difficile à manipuler (d'où l'emploi de bandes magnétiques dans certaines machines).

D 42. MACHINES AVEC INTERPOLATEUR

L'interpolateur effectue les calculs à partir de points de repère de la courbe, et commande les déplacements de la machine au fur et à mesure du calcul (de 10 μ à 1 μ).

D 421. Interpolateur linéaire

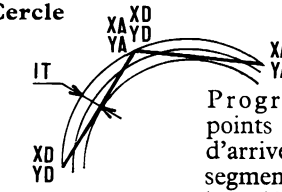
Droite



Programmer les points de départ et d'arrivée.

Fig. 15. — Interpolation linéaire : définition d'une droite (usinage identique à celui de la *fig.* 12 mais avec Δx et Δy de l'ordre de 0,01 mm).

Cercle

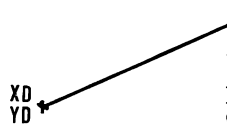


Programmer les points de départ et d'arrivée de chaque segment inclus dans la tolérance.

Fig. 16. — Interpolation linéaire : cercle remplacé par la ligne brisée incluse dans la tolérance IT du cercle.

D 422. Interpolateur circulaire

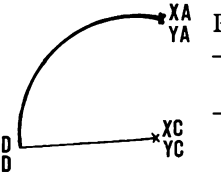
Droite



l'rogrammer les points de départ et d'arrivée.

Fig. 17. — Interpolation circulaire : définition d'une droite.

Cercle



Programmer :
— les points de départ et d'arrivée ;
— le centre du cercle par rapport au point de départ.

Fig. 18. — Interpolation circulaire : définition d'un cercle.

D5. Machines travaillant en contournage espace (3 à 5 axes)

L'outil doit décrire une surface quelconque et doit rester tangent à la surface en chaque point de contact. Le rayon de l'outil doit être perpendiculaire au plan tangent à la surface au point de contact.

Détermination des centres de la fraise hémisphérique

1° **A partir du langage de programmation automatique APT** [pour des cônes, cylindres, sphères, etc. (l'ordinateur fait les calculs à partir de leur définition)].

Exemple : SP = SPHERE/CENTER, P, RADIUS, R (sphère : centre P, rayon R).

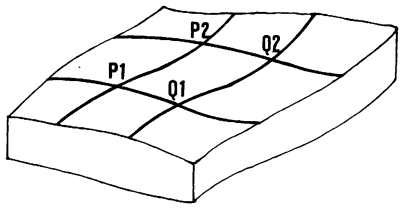


Fig. 19. — Quadrillage pour langage POLYSURF.

2° A partir du langage POLYSURF (pour surfaces quelconques).

On donne les points de la surface (P_1, P_2, Q_1, Q_2) qui forment un quadrillage. L'ordinateur remplace chaque courbe du quadrillage par une succession de cubiques (courbe dont l'équation est du 3e degré).

Autre langage : UNISURF de la Régie Renault pour la définition des carrosseries.

E. SYSTÈMES DE MESURE. INCIDENCES SUR L'ÉCRITURE DES BLOCS

Il existe deux systèmes principaux : les systèmes à mesure digitale et les systèmes à mesure analogique.

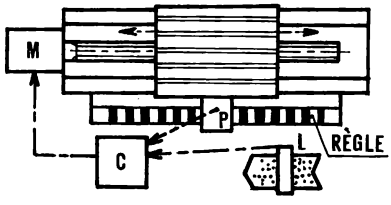
E1. Mesure digitale

Elle fonctionne par décomptage d'impulsions (mesure digitale incrémentale) ou par codage de position (mesure digitale absolue).

Les mouvements sont contrôlés sous forme discontinue par des déplacements élémentaires appelés **incréments** (valeur de l'incrément : 0,01 à 0,02 mm).

E 11. MESURE DIGITALE INCRÉMENTALE

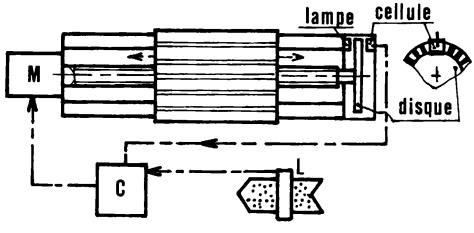
E 111. Mesure directe



Le capteur de position est monté sur la table et la règle est fixe (*fig.* 20). Les impulsions venant du capteur sont décomptées du nombre d'impulsions traduisant la cote à atteindre (paragraphe A31, *fig.* 1).

Fig. 20. — Mesure digitale incrémentale directe (voir aussi *fig.* 1).

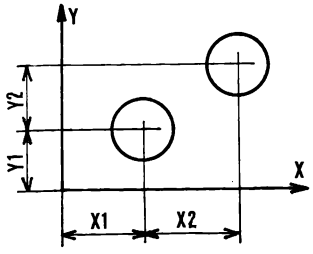
E 112. Mesure indirecte



Un disque est monté à l'extrémité de la vis. On mesure la rotation de cette vis (le disque peut avoir un grand diamètre, donc les traits peuvent être plus larges).

Fig. 21. — Mesure digitale incrémentale indirecte.

E 113. Incidence sur l'écriture des blocs d'information (programme)



Avec la commande digitale incrémentale, la programmation est le plus souvent incrémentale (ou relative).

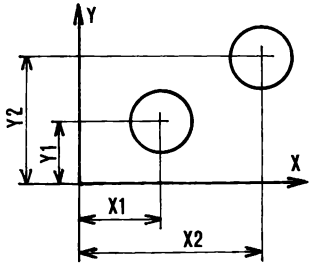
Dans ce cas, il faut indiquer dans les blocs les valeurs des déplacements successifs (ou entre-axes, *fig.* 22) :

Pour le point 1 → X_1 Y_1.

Pour le point 2 → X_2 Y_2.

Il faudra donc calculer les déplacements entre usinages.

Fig. 22. — Coordonnées en programmation relative.



Certaines machines à commande digitale incrémentale peuvent être programmées en absolu. Dans ce cas, un compteur incorporé à l'armoire additionne algébriquement tous les déplacements.

On indique, dans les blocs, les coordonnées des points par rapport à un système d'axes choisi (*fig.* 23).

Pour aller en 1 : X_1, Y_1.

Pour aller en 2 : X_2, Y_2.

Fig. 23. — Coordonnées en programmation absolue.

E 12. MESURE DIGITALE ABSOLUE

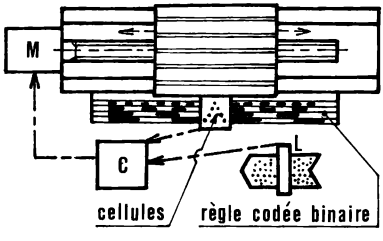


Fig. 24. — Mesure digitale absolue directe.

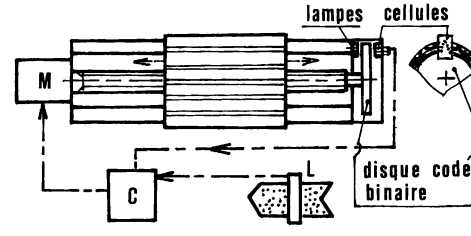


Fig. 25. — Mesure digitale absolue indirecte.

A chaque position occupée par l'organe mobile correspond une position codée en binaire sur la règle (ou le disque) à plusieurs pistes.

Cette valeur donnée par les cellules photo-électriques va être comparée à la valeur lue sur le ruban. La programmation est absolue (*fig.* 23).

E2. Mesure analogique

Le capteur de position donne une valeur électrique « image » de la position de l'élément mobile. La mesure est absolue, la programmation sera donc absolue.

E 21. RÉSOLVEUR (capteur rotatif)

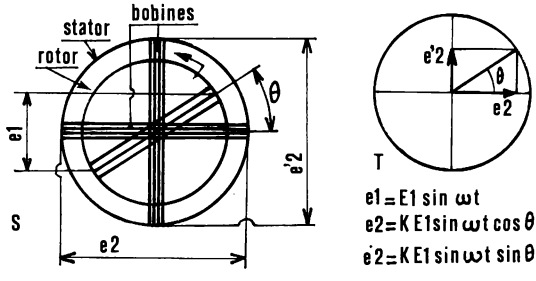


Fig. 26. — **Résolveur.** S : schéma ; T : tensions e_2 et e'_2 et détermination de l'angle θ.

L'angle θ du rotor par rapport au stator est connu quand la machine détecte les tensions électriques e_2 et e'_2.

Incrément de la machine avec un résolveur ≃ 0,01.

Si la course de la table correspond à plusieurs tours du résolveur, la machine compte le nombre de tours complets et considère l'angle θ dans la dernière fraction de tour.

E 22. RÈGLE INDUCTOSYN (capteur linéaire)

Il comprend deux parties coulissantes l'une par rapport à l'autre : la règle et le curseur. Ces pièces sont en matériau non magnétique (verre, céramique) et portent un circuit « en grecque » réalisé selon la technique des circuits imprimés. Le pas du circuit est de 2 mm. La règle est formée d'éléments de 200 mm mis bout à bout.

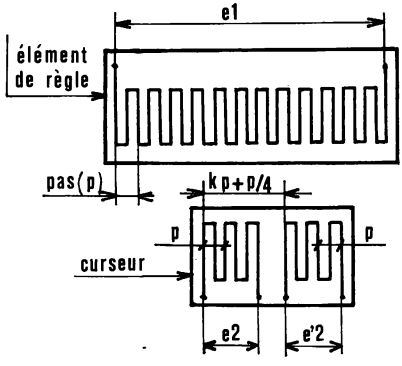


Fig. 27. — **INDUCTOSYN** : élément de règle et curseur écarté de cette règle. En fonctionnement, le curseur est superposé à la règle, à une distance de 0,05 à 0,15 mm.

On peut assimiler l'ensemble à un résolveur bobiné dans le plan. La distance *h* (*fig.* 28) est connue quand la machine détecte les tensions électriques e_2 et e'_2 (*fig.* 27) aux bornes des enroulements du curseur.

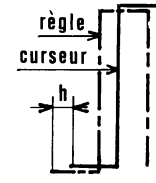


Fig. 28. — Position *h* du curseur par rapport à la règle à l'intérieur d'un pas.

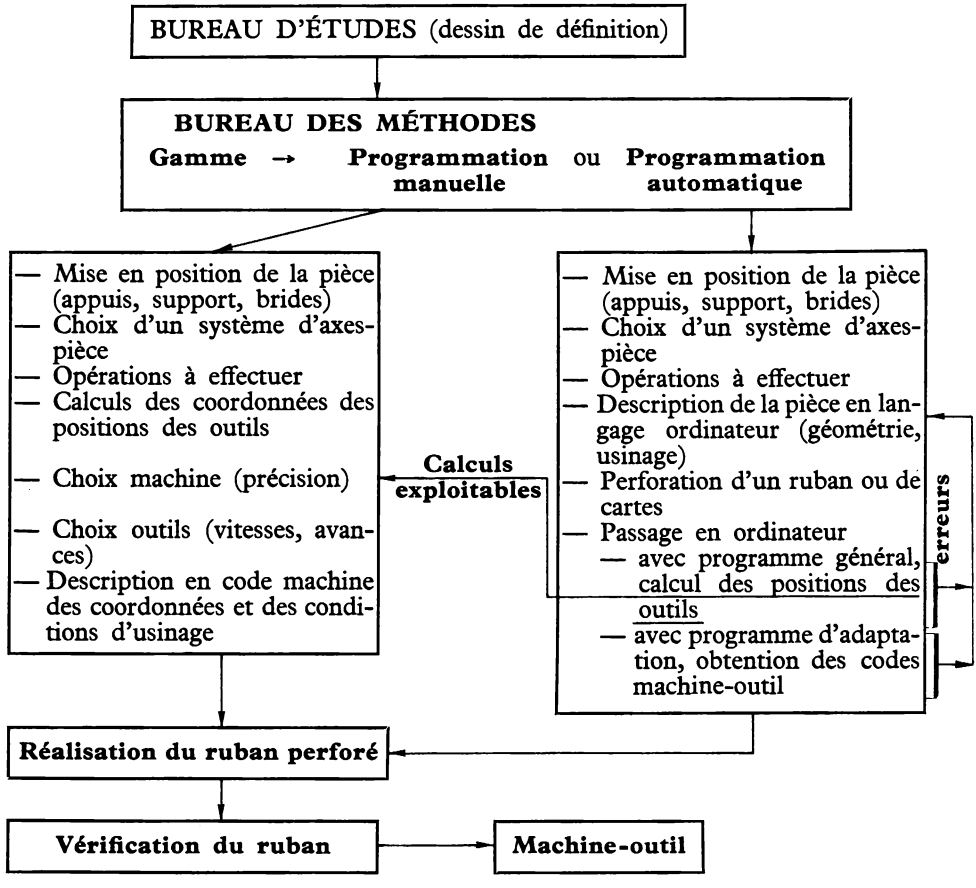
Si la course de la table est supérieure à 2 mm (pas), la machine compte le nombre de pas complets et considère la valeur *h* dans la dernière fraction de pas.
L'Inductosyn peut détecter des déplacements de 0,001 mm. C'est le système de mesure le plus précis. Il est utilisé sur des machines à pointer à commande numérique.

F. PROGRAMMATION

La programmation a pour but de déterminer les différentes tâches que doit accomplir la machine et de les enregistrer sur le ruban perforé, élément de commande de la machine.

F1. Méthodes

Le déroulement des deux méthodes possibles est donné dans l'organigramme ci-dessous : programmation manuelle et programmation automatique.



F2. Exemple de programmation manuelle

F 21. DESSIN DE DÉFINITION (*fig.* 29 : étude partielle)

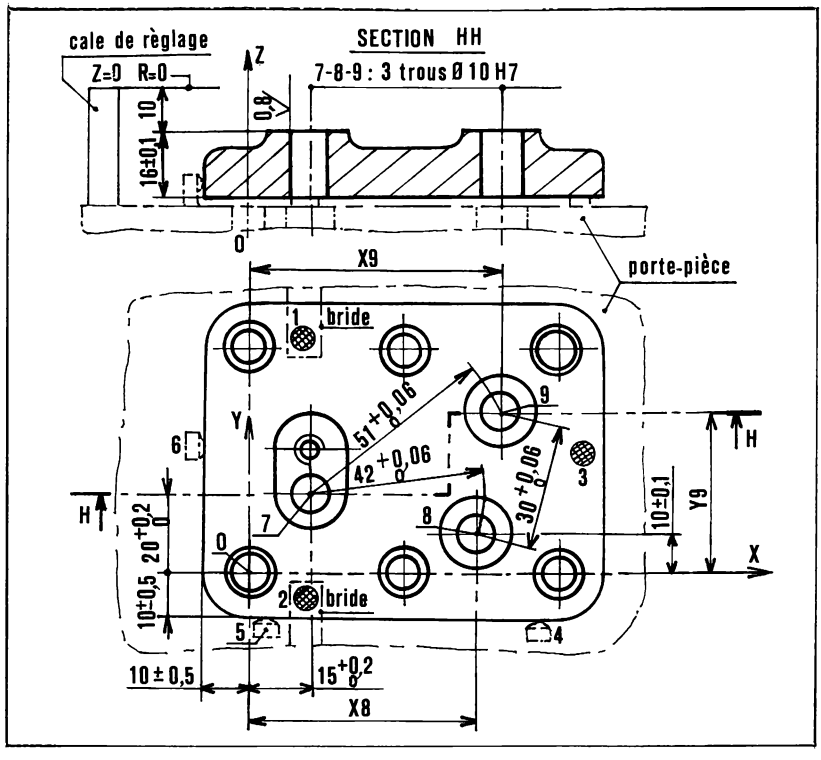


Fig. 29. — **Couvercle** (définition partielle). Porte-pièce pour la phase de commande numérique.

F 22. MISE EN POSITION DE LA PIÈCE

Principes généraux : Les appuis, le support de pièce et les brides seront choisis pour que l'on puisse usiner le plus grand nombre de surfaces possible sans démonter la pièce. Le support est souvent une plaque sur laquelle sont placés les appuis et les serrages.

La position des brides est parfaitement définie par le programmeur et respectée par le dessinateur, car il est peut-être nécessaire de décrire un trajet d'outil pour éviter ces brides. Tout changement de position risque de provoquer une collision bride-outil.

F 23. CHOIX DES ORIGINES ET CHOIX DES AXES

F 231. Choix des origines

Selon que la machine est conçue avec « zéro fixe » ou avec « zéro flottant », le programmeur et le régleur adoptent la démarche correspondante ci-dessous.

ZÉRO FIXE. L'origine est fixée lors de la construction. Le codeur est positionné en conséquence et ce sont les pièces à usiner qui doivent être mises en position sur la table par rapport à ce zéro.

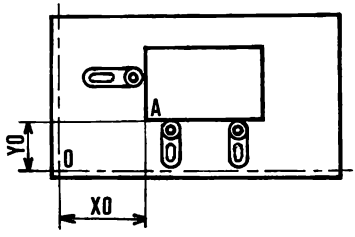


Fig. 30. — Mise en position d'une pièce en zéro fixe (A à X_0, Y_0 du point 0).

— Le programmeur fixe une origine pièce A dont les coordonnées par rapport à o sont X_0 et Y_0.

— Sur le programme, il ajoute les coordonnées X_0 et Y_0 à toutes les cotes de la pièce données par rapport à A.

— Le régleur doit mettre la pièce sur la table pour que A soit en X_0 et Y_0.

ZÉRO « FLOTTANT » (solution de plus en plus utilisée).

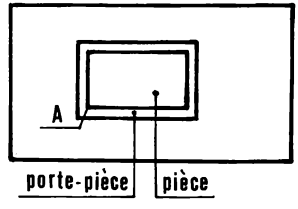


Fig. 31. — Mise en position avec zéro « flottant » (A quelconque sur la table).

— Le programmeur fixe une origine pièce A et indique, sur le programme, les cotes de la pièce par rapport à A.

— A l'atelier, le régleur met en place le montage en un point quelconque de la table, centre la broche sur l'origine choisie A (par commande manuelle), remet les compteurs à zéro (initialisation), ou laisse leur valeur affichée (dans ce cas, cette valeur sera automatiquement ajoutée à la coordonnée lue dans le programme).

F 232. Choix des axes (travail en zéro flottant)

XOY (*fig.* 29) : o au point 1 ; respect des cotes de liaison au brut 10 ± 0,5, ce qui définit les appuis 4-5-6. D'une manière générale, les axes sont choisis pour que les calculs de coordonnées soient les plus simples possibles.

Z : réglage du zéro de chaque outil sur une cale choisie par le programmeur (zéro flottant rendant la programmation indépendante de la longueur des outils).

F 24. LISTE DES OPÉRATIONS. CALCUL DES POSITIONS D'OUTILS (programmation absolue). VITESSES. AVANCES

Nous limiterons cette étude à l'usinage de trois trous ⌀ 10H7 (7-8-9).

Disposition des résultats : celle de la feuille de programmation.

Objectifs :

— Préparer tous les éléments qui seront traduits ultérieurement en langage machine.

— Traiter les étapes méthodiquement (positions d'outils, calculs, conditions technologiques) et ne pas les mélanger avec l'écriture des blocs (erreurs réduites).

Opérations — Calculs	X	Y	Course Z	Avance	Position atteinte en rapide	Vitesse	Position
	Perçage Ø 8 (long. 20 mm). Foret court (pas de pointage)						
	15,1	20,1	20	75 mm/mn (0,1 mm/tr)	9,5 (10-0,5) *fig.* 33	18 m/mn ⇓ 750 tr/mn (gamme machine)	7
	55,89 (X8)	10					8
	62,37 (X9)	39,32 (Y9)					9
	Alésage Ø 9,5 (demi-finition) outil à aléser CW						
	62,37	39,32	17	0,1/tour ⇓ 212 mm/mn	9,5	70 m/mn ⇓ 2 120 tr/mn (gamme machine)	9
	55,89	10					8
	15,1	20,1					7
finition Ø 10H7 (outil à aléser Ø 10H7)	15,1 55,89 62,37	20,1 10 39,32	17	212 mm/mn	9,5	2 120 tr/mn	7 8 9

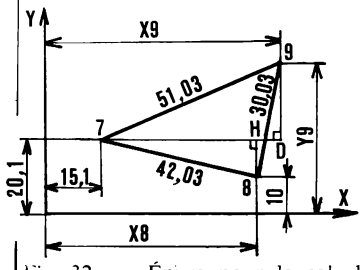


Fig. 32. — Épure pour le calcul de X_8, X_9, Y_9.

Les coordonnées de 8 (X8) et 9 (X9, Y9) doivent être calculées en étudiant le triangle quelconque 7-8-9 et les triangles rectangles 7-8-H et 7-9-D

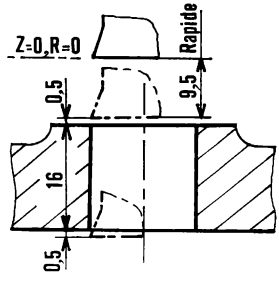


Fig. 33. — Trajet de l'outil d'alésage.

F 25. FEUILLE DE PROGRAMMATION

N° Blo	Usin.	X	Y	Course travail sur Z	Avance	Position atteinte en rapide sur Z	Vitesse broche	Outil	Fonct. Aux	Position
N00	G81	X01510	Y02010	Z02000	F575	R00950	S675	T01	M03	7
N002		X05589	Y01000							8
N003		X06237	Y03932						M06	9
N004	G81	X06237	Y03932	Z01700	F621	R00950	S721	T02	M03	9
N005		X05589	Y01000							8
N006		X01510	Y01000						M06	7
N007	G85	X01510	Y01000	Z01700	F621	R00950	S721	T03	M03	7
N008		X05589	Y01000							8
N009		X06237	Y03932						M02	9

↑
Cette colonne ne figure pas sur le ruban

Nota. — G85 : alésage à l'avance travail, remontée à l'avance travail.
M02 : fin de programme.

F3. Programmation automatique

F 31. OBJECTIFS

— Confier à l'ordinateur l'exécution des calculs des positions d'outils.

Le calcul peut être très long en programmation manuelle (1 h pour calculer les coordonnées de 7-8-9, page 300).

Le nombre de points à déterminer peut devenir très important pour des opérations de fraisage en contournage plan et surtout en contournage espace.

Seul l'ordinateur peut effectuer les volumineux calculs nécessaires, dans des conditions de prix, de sécurité, et de délai acceptables.

— Générer directement le ruban perforé qui ira sur la machine-outil.

Les coordonnées calculées par l'ordinateur peuvent être exploitées par un programmeur pour écrire les blocs manuellement (liaison « calculs exploitables » sur l'organigramme page 297). Mais l'établissement du programme et la perforation manuelle de la bande sont des opérations longues où les erreurs peuvent être nombreuses.

La génération des blocs par l'ordinateur apparaît, dès lors, comme une amélioration de la tâche du programmeur et une réduction du temps de préparation de la pièce.

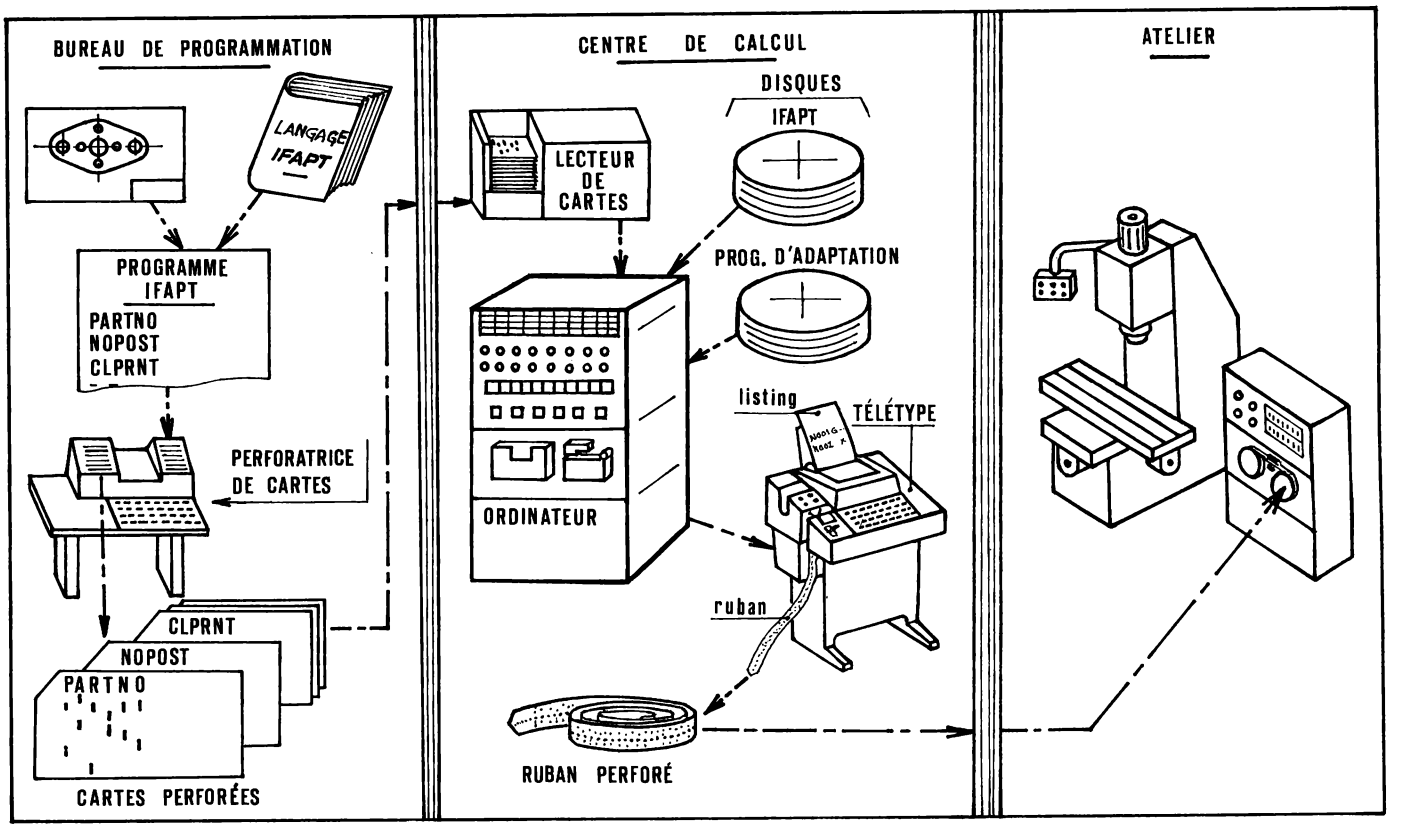


Fig. 34. — **Illustration de la programmation automatique.**

F 32. DIFFÉRENTES PHASES DE LA PROGRAMMATION AUTOMATIQUE

F 321. Illustration (fig. 34)

F 322. Déroulement

1° Travail du bureau de programmation.
— Description de la pièce en langage compréhensible par l'ordinateur (géométrie, usinage). Dans l'illustration ci-contre, choix du langage IFAPT.
— Perforation des cartes (une carte par ligne du programme).

2° Traitement au centre de calcul.
— Lecture des cartes.
— Traitement avec traducteur IFAPT (les coordonnées des positions d'outils sont imprimées sur la télétype).
— Traitement avec programme d'adaptation (les blocs d'informations sont imprimés sur la télétype et le ruban établi aux codes machine est perforé en même temps). Le ruban sera vérifié sur table à tracer.

3° Atelier.
Le ruban généré et vérifié va permettre l'exécution de la série de pièces.

F 33. PREMIÈRE PHASE : DESCRIPTION DE LA PIÈCE

F 331. Extraits du langage IFAPT (pages 304 à 307)

Chaque définition de figure (ou format) est composée de la façon suivante :

NOM SYMBOLIQUE = DÉSIGNATION FIGURE/DESCRIPTION FIGURE

Exemple : P5 (fixé par le programmeur) = PØINT/INTØF, L_1, L_2.

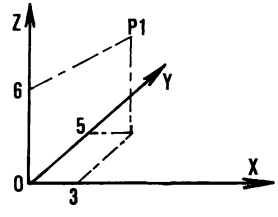
Le nom symbolique doit commencer par une lettre et avoir moins de 6 caractères. La partie à droite du signe = doit être rigoureusement respectée. Toute incorrection du texte ou de la ponctuation entraîne l'arrêt du traitement en ordinateur (voir paragraphe F3521).

Signification des mots anglais inclus dans les formats des pages 304 à 307 :

Mot	Signification	Mot	Signification	Mot	Signification
ARC	arc de cercle	GØTØ	aller à (usinage)	RADIUS	rayon
ATANGL	angle	LINE	ligne	RTHETA	coordonnées polaires
CENTER	centre	LARGE	le plus grand	SMALL	le plus petit
CIRCLE	cercle	LINEAR	sur une ligne	TANTØ	tangent
CCLW	sens trigonométrique	MATRIX	matrice	TRANSL	translation
CLW	sens antitrigono.	MØDIFY	modifier	XY PLAN	plan XOY
CØPY	recopier	PARLEL	parallèle	XY RØT	rotation de XOY
IN	intérieur	PATERN	réseau	X LARGE	le plus grand X
INDEX	début d'une partie copiée	PERPTØ	perpendiculaire	X SMALL	le plus petit X
		PØINT	point	Y LARGE	le plus grand Y
INTØF	intersection	ØUT	extérieur	Y SMALL	le plus petit Y

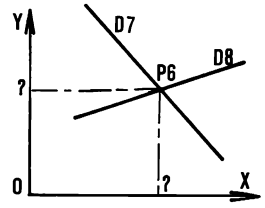
DESCRIPTION DU POINT

1° Point défini par ses coordonnées X, Y, Z



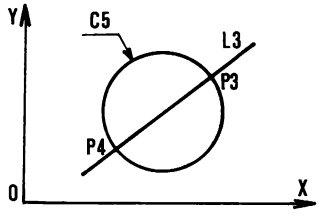
P1 = PØINT/3,5,6

2° Point défini par l'intersection de deux droites



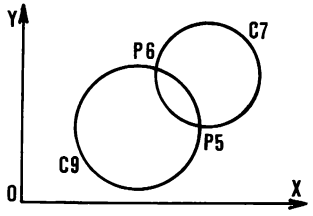
P6 = PØINT/INTØF, D7, D8

3° Point défini par l'intersection d'une droite et d'un cercle



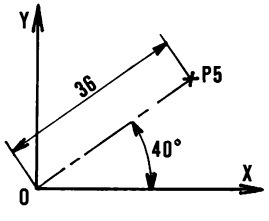
P3 = PØINT/XLARGE, INTØF, L3, C5
P4 = PØINT/XSMALL, INTØF, L3, C5

4° Point défini par l'intersection de deux cercles



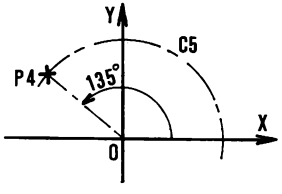
P5 = PØINT/XLARGE, INTØF, C7, C9
P6 = PØINT/YLARGE, INTØF, C7, C9

5° Point défini par ses coordonnées polaires



P5 = PØINT/RTHETA, XYPLAN, 36, 40

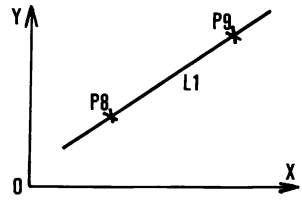
6° Point placé sur un cercle et faisant un angle donné avec l'axe X



P4 = PØINT/C5, ATANGL, 135

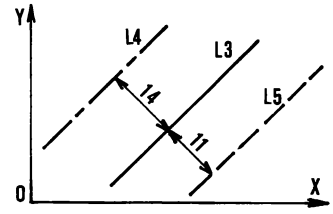
DESCRIPTION DE LA DROITE

1° Droite définie par deux points



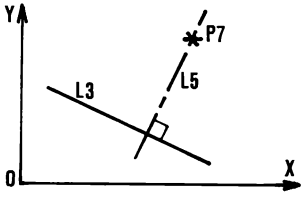
L1 = LINE / P8, P9

2° Droite parallèle à une droite donnée



L4 = LINE / PARLEL, L3, YLARGE, 14
L5 = LINE / PARLEL, L3, X LARGE, 11

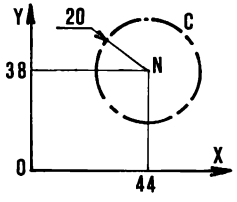
3° Droite passant par un point donné et perpendiculaire à une droite donnée



L5 = LINE / P7, PERPTΦ, L3

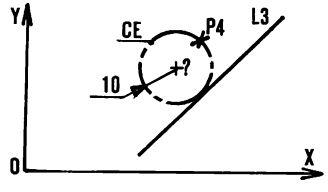
DESCRIPTION DU CERCLE

1° Cercle défini par son centre et son rayon



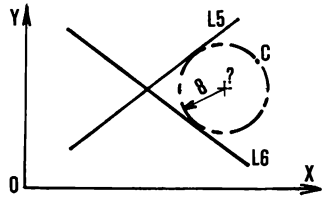
C = CIRCLE / 44, 38, 20
ou
C = CIRCLE / CENTER, N, RADIUS, 20

2° Cercle défini par son rayon, une droite à laquelle il est tangent et un point donné



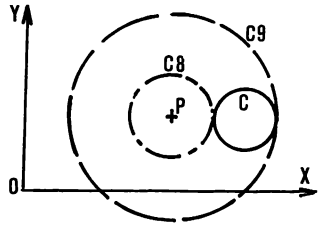
CE = CIRCLE / TANTΦ, L3, YSMALL, P4, RADIUS, 10

3° Cercle défini par son rayon et deux droites auxquelles il est tangent



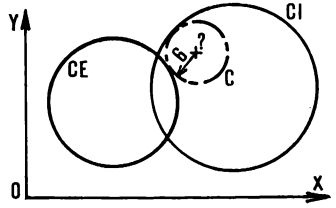
C = CIRCLE / YSMALL, L5, YLARGE, L6, RADIUS, 8

4° Cercle défini par son centre et un cercle auquel il est tangent



C8 = CIRCLE/CENTER,P,SMALL,TANTΦ,C
C9 = CIRCLE/CENTER,P,LARGE,TANTΦ,C

5° Cercle défini par son rayon et deux cercles auxquels il est tangent

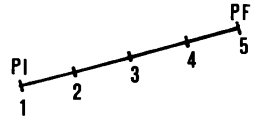


C = CIRCLE/YLARGE,ΦUT,CE,IN,CI,RADIUS,6

DESCRIPTION DES RÉSEAUX DE POINTS (STRUCTURES)

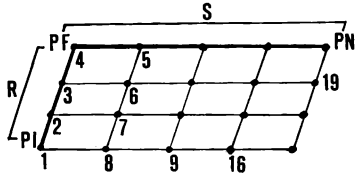
1° Réseau de points sur droites

Données : points d'origine et d'extrémité du segment ; nombre de points de la structure ; points équidistants



R = PATERN /LINEAR,PI,PF,5

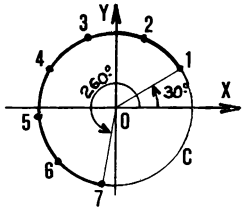
2° Structure définie par deux structures linéaires (points équidistants sur chaque structure)



QUAD= PATERN/PARLEL,R,S

3° Réseau de points équidistants sur cercle

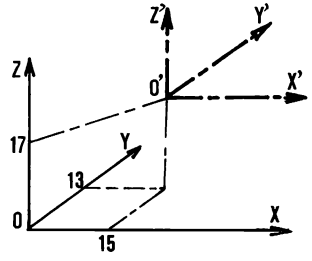
Données : angles d'origine et d'extrémité de la structure ; le sens de définition, le nombre total de points



RC = PATERN/ARC,C,30,260,CCLW,7

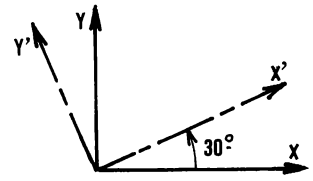
MATRICES DE TRANSFORMATION

1° Matrice de translation



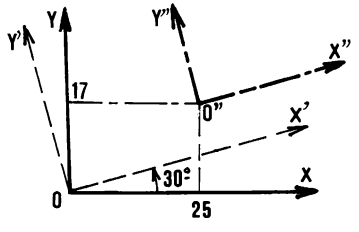
M1 = MATRIX/TRANSL, 15, 13, 17

2° Matrice de rotation



M1 = MATRIX/XY ROT, 30

3° Matrice de rotation et translation



M1 = MATRIX/XY ROT, 30, TRANSL, 25, 17, 0

COPIE DE FIGURES

La cotation des 3 trous placés sur le cercle C_1 (structure PAT) suffit à la détermination des X et des Y des 12 trous de la figure.

Le programme ci-dessous copie 3 fois la structure initiale en utilisant chaque fois une matrice de rotation M_1.

Définitions géométriques :

P1 = PØINT/RTHETA, XY PLAN, 35, 30 (Coord. polaires de P_1).

C1 = CIRCLE/CENTER, P1, RADIUS, 14 (Cercle recevant les 3 trous).

PAT = PATERN/ARC, C1, 90, — 30, CCLW, 3 (Réseau des 3 points sur C_1).

M1 = MATRIX/XY RØT, 90 (Matrice de rotation de 90°).

Définition usinage :

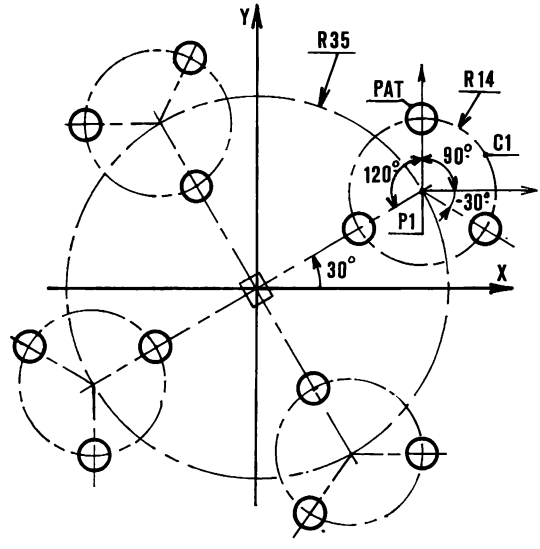
INDEX/1 (Départ de la partie de programme copiée).

GØTØ/PAT (Usinage du réseau PAT).

CØPY/1, MØDIFY, M1, 3

↓ Index ↓ 3 copies

(L'ordinateur recopie la figure PAT 3 fois en lui faisant effectuer, chaque fois une rotation de 90° (matrice M_1).



F 332. Application à la réalisation du couvercle (*fig.* 29, trous 7-8-9)

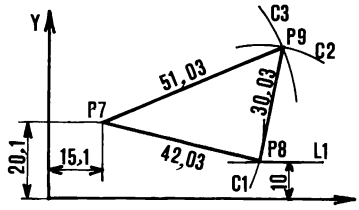


Fig. 35. — Désignation des géométries pour le traitement en programmation manuelle.

	PROGRAMME	SIGNIFICATION
1	PARTNO/COUVERCLE	PARTNO (obligatoire) introduit le titre
2	CLPRNT	Permet l'impression des résultats
3	NOPOST	Il n'y a pas de programme d'adaptation
4	P7 = POINT/15.1, 20.1, 0	Point P_7 (X15,1, Y20,1, Z0)
5	L1 = LINE/0, 10, 0, 100, 10, 0	Droite définie par 2 points (X0, Y10, X100, Y10)
6	C1 = CIRCLE/CENTER, P7, RADIUS, 42.03	Cercle centré en P_7, rayon 42,03
7	P8 = POINT/XLARGE, INTOF, L1, C1	Point 8 intersection de L_1 et C_1 (le + grand X)
8	C2 = CIRCLE/CENTER, P8, RADIUS, 30.03	Cercle centre P_8, rayon 30,03
9	C3 = CIRCLE/CENTER, P7, RADIUS, 51.03	Cercle centre P_7, rayon 51,03
10	P9 = POINT/XLARGE, INTOF, C2, C3	P_9 intersection des cercles C_2, C_3 (plus grand X)
11	PAT1-PATERN/RANDOM, P7, P8, P9	Réseau composé des points 7-8-9
12	FROM/P7	Mise en position de l'outil en 7
13	PPRINT PERÇAGE DIA 8	Commentaire précisant l'usinage qui suit
14	TOOLNO/1	Outil 1 (foret ⌀ 8)
15	SPINDL/750, CLW	Rotation broche (SPINDL), à droite (CLW), 750 tr/mn
16	CYCLE/DRILL, 20, 75, MPM, 9.5	Perçage prof. 20 mm, Av. 75 mm/mn (MPM), Ap. rap. sur 9,5 mm
17	GOTO/PAT1	Perçage sur le réseau 7-8-9
18	SPINDL/OFF	Arrêt de la broche
19	PPRINT DEMI-FINITION	Commentaire
20	TOOLNO/2	Outil 2
21	SPINDL/2120, CLW	Rotation broche à droite 2 120 tr/mn
22	CYCLE/DRILL, 17, 212, MPM, 9.5	Perçage prof. 17, Av. 212 mm/mn, Ap. rap. sur 9,5 mm

PROGRAMME	SIGNIFICATION
23 GOTO/PAT1, INVERS	Usinage du réseau 9-8-7 (inverse de 7-8-9)
24 SPINDL/OFF	Arrêt broche
25 PPRINT FINITION DIA 10	Commentaire
26 TOOLNO/3	Outil 3
27 SPINDL/2120, CLW	Rotation broche à droite 2 120 tr/mn
28 CYCLE/BORE, 17, 212, MPM, 9.5	Alésage (bore) prof. 17 mm, Av. 212 mm/mn, Ap. rap. 9,5 mm
29 GOTO/PAT1	Usinage de 7-8-9
30 SPINDL/OFF	Arrêt broche
31 END	Fin de programme
32 FINI	Arrêt général

Temps d'écriture du programme : 7′ ; temps de frappe : 10′.

F 34. DEUXIÈME PHASE : PERFORATION DES CARTES

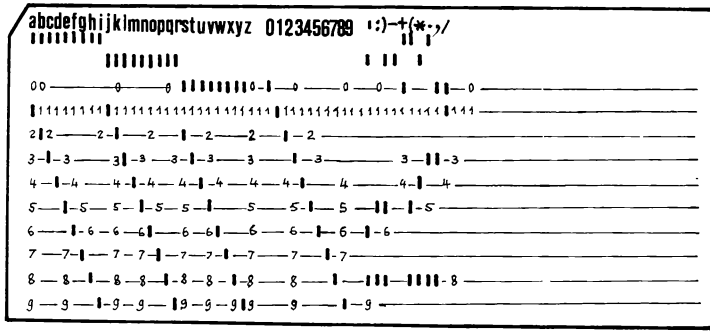


Fig. 36. — Codes des cartes perforées.

— Pour chaque ligne du programme, on va établir une carte.
— Chaque caractère de ligne est codé par une série de perforations verticales (voir code ci-contre).
— En haut de la carte, on reporte le texte correspondant aux perforations, pour vérification.

Nota. — Sur certains ordinateurs, la rentrée du programme est faite avec un ruban perforé.

F 35. TROISIÈME PHASE : TRAITEMENT DU PROGRAMME EN ORDINATEUR

F 351. Préparation de l'ordinateur

— Introduction, dans l'ordinateur, du « traducteur » du langage choisi (disques *fig.* 34).
— Introduction du programme d'adaptation à la machine-outil (si on le possède).
— Mise en place des cartes dans le lecteur de cartes.

F 352. Travail de l'ordinateur

F 3521. Travail avec le traducteur du langage (ici IFAPT)

Le contenu de chaque carte est interprété de la façon suivante :

1° Vérification de l'orthographe et de la ponctuation.

Exemple : P_5 = PØINT/INTØF, L_1, L_2.

— P_5 : si ce nom symbolique respecte les règles propres au langage, l'ordinateur le prend comme tel.

— A droite du signe = l'écriture des mots est rigoureuse. L'ordinateur va regarder s'il possède dans son « dictionnaire » les mots PØINT, INTØF et va regarder si L_1 et L_2 ont été définies précédemment. Si le mot PØINT est écrit PØINS, par exemple, ou si une virgule a été remplacée par un autre signe de ponctuation, l'ordinateur indique une erreur et n'est pas capable de continuer le traitement.

2° Recherche de la signification.

L'ordinateur va situer l'instruction qu'il traite parmi toutes les instructions qui peuvent donner la figure désignée (points, droites, cercles...).

La connaissance de cette situation va lui permettre de trouver le programme de calcul correspondant.

3° Calcul des coordonnées de la position de l'outil.

L'ordinateur possède dans son « traducteur » la méthode de calcul propre à chaque cas. Il va appliquer celle qu'il a identifiée et il va imprimer les résultats X et Y cherchés, dans l'ordre d'usinage demandé (si le calcul n'est pas possible, l'ordinateur donne un message d'erreur et s'arrête ; *exemple :* recherche de l'intersection de deux droites parallèles...).

Résultats pour le programme écrit page 308 (perçage ⌀ 8) :

```
14  TOOLNO          1.000000
15  SPINDL        750.000000        CLW
16  CYCLE           DRILL          20.000000        75.000000        MPM
16                  9.500000
17     POINT /
  X =          15.100000  Y =        20.100000  Z =           .000000
17     POINT /
  X =          55.898418  Y =        10.000000  Z =           .000000
17     POINT /
  X =          62.370361  Y =        39.324305  Z =           .000000
18     SPINDL             OFF
```

Temps pour le traitement du programme et l'impression de ces résultats : 3 minutes environ.

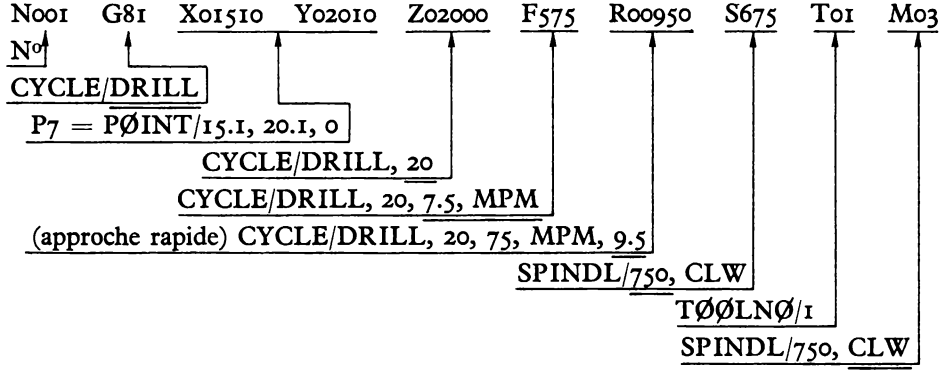
F 3522. Travail avec le programme d'adaptation

Le programme d'adaptation permet :

1° La lecture des coordonnées X et Y qui viennent d'être calculées et la lecture des instructions d'usinage en ces points.

2° D'adapter ces informations aux codes de la machine-outil qui va réaliser ces usinages et de générer les blocs d'informations qui vont permettre ces usinages.

Exemple : bloc généré pour le perçage du point P_7 (au-dessous de chaque mot, nous précisons l'information qui a permis la génération de ce mot ; l'information est soulignée dans certains cas).



— Ces blocs seront imprimés et perforés pour donner le ruban machine-outil.

— Des messages d'erreurs peuvent être donnés en cours de travail si les impératifs de la machine ne sont pas respectés (*exemple :* distance entre deux points supérieure à la course de la machine).

— On peut, à des fins de vérification, visualiser la trajectoire de l'outil sur un écran cathodique.

Nota. — Étant donné la finalité d'un programme d'adaptation, il faut un programme par langage, par ordinateur, et par machine-outil.

Ces programmes sont écrits par des équipes spécialisées.

F 36. PRINCIPAUX LANGAGES DE COMMANDE NUMÉRIQUE

F 361. L'A.P.T.

C'est le langage le plus évolué. Il peut définir des surfaces dans trois dimensions (cylindres, cônes, sphères, surfaces réglées...) ainsi que des géométries planes. Ce langage ne peut passer que sur de gros ordinateurs.

F 362. ADAPT, IFAPT

Ce sont des dérivés de l'APT. Ils ne peuvent traiter que des géométries planes (cas d'une grande partie des pièces mécaniques). Ils peuvent être utilisés sur des ordinateurs de moyenne capacité : ADAPT sur des IBM ; IFAPT sur plusieurs modèles.

F 363. Langages pour mini-ordinateurs

Pourquoi ces langages ?

1° Toutes les entreprises ne peuvent posséder des ordinateurs de moyenne capacité, dont la location et les frais de mise en œuvre sont importants.

2° Aucune société ne peut justifier la location d'ordinateurs importants pour la commande numérique seulement. Si un ordinateur est implanté pour la gestion, on peut envisager un complément d'utilisation pour la programmation automatique.

3° L'ensemble de la fourniture (mini-ordinateur + langage) devient accessible aux petites et moyennes entreprises.

4° Ils permettent de préparer, de manière très satisfaisante, la fabrication de nombreuses pièces mécaniques.

5° Ils donnent au bureau de programmation une autonomie qu'il n'a pas lorsqu'il est lié à l'ordinateur général de l'entreprise (la priorité est toujours donnée à la gestion, à l'ordonnancement, à la facturation).

Quelques solutions (ordre alphabétique) :

ELAN (Société Hewlett-Packard) ; PAM (Société SAPEX) ; PROMO (CII-ADÉPA).

G. LA COMMANDE ADAPTATIVE

G1. Qu'est-ce que c'est ?

C'est une technique qui permet à la machine-outil à commande numérique de réaliser automatiquement, en cours de travail, l'adaptation des vitesses de coupe et des avances aux conditions technologiques rencontrées pendant l'usinage, afin de rendre ces vitesses optimales selon les conditions favorables ou défavorables.

G2. Pourquoi ?

Avec la machine-outil à commande numérique conventionnelle, le programmeur donne la vitesse et l'avance en tenant compte des éléments défavorables du travail. Il y a donc perte de temps lorsque la machine travaille dans de meilleures conditions.

G3. Comment peut-on apporter ces corrections ?

Des capteurs, montés dans le nez de la broche de la machine, mesurent les variations de couple et les variations de flexion suivant les axes X, Y. Les informations fournies par ces capteurs sont transmises à l'appareil d'adaptation, qui donne des ordres de modification de coupe à la machine.

G4. Principaux cas d'intervention

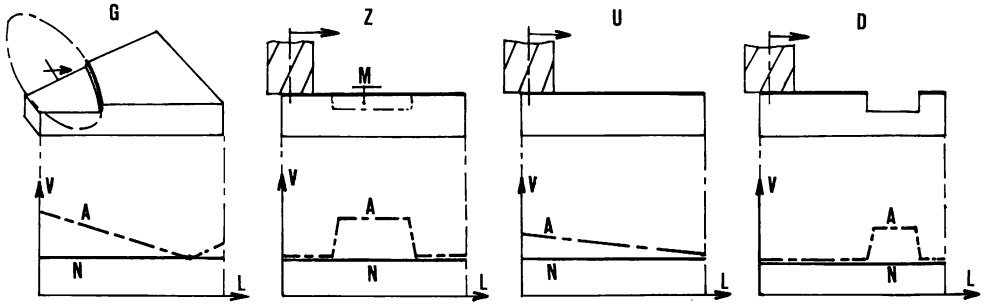


Fig. 37. — Commande adaptative et commande numérique ordinaire : cycles comparés de l'avance de l'outil dans quatre cas. (G : variation de largeur ou de profondeur de coupe; Z : zones moins dures M; U : usure de l'outil; D : dégagements dans la pièce.)

H. ÉVOLUTION DE LA COMMANDE NUMÉRIQUE: COMMANDE DIRECTE DES MACHINE-OUTILS

H1. Pourquoi?

— Le temps d'arrêt lié à la programmation et à la correction des programmes peut paraître important pour certaines entreprises.

— La logique des armoires classiques est câblée. Elle peut réaliser des fonctions bien précises, mais rigides. La création des micro-processeurs apporte plus de souplesse et de performance.

— La détection des pannes est parfois difficile.

H2. Comment peut être assurée l'évolution ?

— Par l'emploi d'un ordinateur qui contiendra une logique programmée, donc souple. C'est la commande directe, dont les deux grands types sont :

  — la CNC (*Computerized Numerical Control* ou Commande numérique par calculateur),

  — la DNC (*Direct Numerical Control*).

H3. Particularité de la C.N.C.?

Principe : L'armoire de commande de la machine contient un mini-ordinateur qui conduit cette machine.

C'est un programme spécial (logiciel) qui permet l'exécution de calculs, qui gère et déclenche les ordres nécessaires à la machine.

L'utilisateur introduit un programme-pièce à l'aide d'une bande perforée, ou en utilisant le pupitre monté sur l'armoire. Ces informations sont mémorisées.

Avantages

— L'introduction directe du programme en utilisant le pupitre est intéressante pour des programmes simples. Un écran cathodique permet de visualiser les blocs au fur et à mesure du déroulement. On peut obtenir une bande définitive après mise au point.

— La modification de tout programme pièce est possible, grâce à ce pupitre (insertion, effacement, correction des blocs).

— La production d'une nouvelle bande corrigée peut être réalisée directement, en raccordant un perforateur de bande à l'armoire.

— On peut introduire des informations relatives aux conditions de coupe (variation des vitesses ou avances pour optimisation).

— On possède de multiples corrections de rayons et de longueurs d'outils (qui permettent de transformer les cotes obtenues lors du réglage de la première pièce, ou en cours de production).

— La machine possède un programme de détection de pannes (donc réduction des temps de maintenance).

— Possibilités de standardiser les armoires de commande (pour des machines différentes, on agit sur le logiciel).

— C'est une conception importante dans la réalisation de l'évolution suivante : la D.N.C.

H4. Particularité de la D.N.C.?

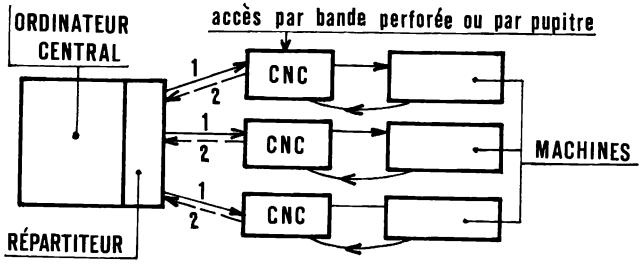


Fig. 38. — Principe de la commande directe par calculateur.

— Plusieurs machines sont connectées à un ordinateur central. Chaque machine est une C.N.C. dont le calculateur collecte et distribue les informations (sens 1, *fig.* 38). Le calculateur sert de tampon entre la machine et l'ordinateur central.

— L'ordinateur central peut recevoir des informations des C.N.C. (sens 2), pour mettre au point des programmes ou pour interpréter des données de marche de la machine.

— Dans certaines installations très évoluées, on confie à l'ordinateur un rôle de gestion (choix des pièces à passer en priorité, répartition entre machines).

I. DOMAINES D'EMPLOI DE LA COMMANDE NUMÉRIQUE

Le contrôle des déplacements, rendu possible par la commande numérique, est applicable à des travaux autres que le fraisage ou le perçage, mais aussi à toutes les activités imaginées par l'homme.

Quelques applications

— **Tournage** (application qui concurrence le fraisage et le perçage). *Solutions :*
  — tours à deux tourelles carrées (8 outils programmables) ;
  — tours à tourelles multipostes :
    — axe de la tourelle horizontal et parallèle à la broche,
    — axe vertical type tour semi-automatique ;
  — tour à magasin d'outils (15 outils amenés et évacués par un bras chargeur-déchargeur automatique).

— **Rectification :**
  — machines particulières pour arbres à cames, pour la réalisation de gabarits reproducteurs.

— **Poinçonnage** (*fig.* 39) :

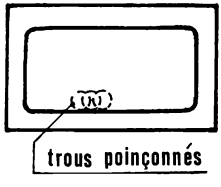


Fig. 39. — Détourage par poinçonnage.

Détourage par coups de poinçons successifs, pour obtenir des formes extérieures ou intérieures quelconques dans de la tôle.
— **Cisaillage.**
— **Pose de rivets.**
— **Pliage, cintrage.**
— **Assemblage.**

J. EXPLOITATION DE LA COMMANDE DIRECTE

(ordinateur associé à une machine-outil)

1° Soudage par points

Un ordinateur, associé à ces machines en grande série, permet de gérer les cycles, assure le comptage des points réalisés et émet un rapport d'intervention sur les électrodes lorsque le seuil d'utilisation est atteint.

2° Soudage par bombardement électronique

L'ordinateur reçoit le programme de soudage de la pièce et pilote les chariots ou la déflexion du faisceau d'électrons pour assurer la réalisation automatique des cordons.

3° Perçage par bombardement électronique

Ces machines peuvent percer des trous de 0,03 mm à 1 mm dans des tôles d'épaisseur 0,1 à 3 mm (cadence de perçage maxi : 10 000 trous à la seconde).

L'ordinateur contrôle les rotations, inclinaisons, déplacements des outillages et les déclenchements du faisceau d'électrons, pour réaliser la séquence programmée.

4° Electro-érosion par fil

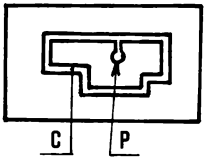


Fig. 40. — Découpage d'un contour C avec électro-érosion par fil (démarrage à partir du trou P, percé préalablement dans la chute).

— Pour réalisation des ouvertures de matrices de découpage ou pour la mise en forme de poinçons...

— Un fil traverse la pièce (passage par un trou préalablement percé dans la chute). L'ordinateur de la machine pilote les mouvements des tables pour que le contour programmé se présente devant le fil. Par érosion, il y a réalisation d'une saignée (largeur : 0,3 mm environ), donc découpage.

Nota. — Le fil se dévide régulièrement, à une vitesse qui tient compte de son érosion propre.

5° Oxycoupage

Les données numériques décrivant la pièce vont servir au contrôle du déplacement du chalumeau.

6° Équilibrage des vilebrequins (en grande série)

Les valeurs du balourd et sa position sont enregistrées en mémoire. Le calculateur en déduira les plongées des fraises sur les masses d'équilibrage et contrôlera leur déplacement.

7° Traçage et dessin

But : Définition des surfaces de formes quelconques sur une table à dessiner connectée à un ordinateur à partir de logiciels spécifiques (UNISURF de la Régie Renault).

Application : étude des carrosseries.

Processus :

— **Réalisation des maquettes :**

— Une maquette en plâtre est réalisée par un styliste.

— On fabrique une maquette à l'échelle réduite, pour les essais en soufflerie.

— **Relevé de points :**

On relève les points caractéristiques de la voiture en plâtre sur une machine automatique associée à un ordinateur.

— **Modification de la maquette en plâtre :**

D'après les conclusions des essais en soufflerie.

— **Dessin de la carrosserie :**

Il est fait à l'échelle 1 sur une machine à dessiner à commande numérique, d'après les indications de l'ordinateur (table de 6 m de long sur 2 m de large).

— **Recherche des points caractéristiques des courbes :**

- — Le styliste et le spécialiste carrosserie peuvent apporter des corrections sur le dessin, à la main, à certaines parties du profil.
- — On cherche, dans l'espace, un certain nombre de points caractéristiques qui vont définir l'équation de la courbe.
- — Ces éléments de définition sont introduits en ordinateur. On a alors, dans cet ordinateur, un « modèle mathématique » de la voiture.

— **Dessins divers :**

On peut demander à l'ordinateur différentes vues perspectives. La bande perforée qu'il génère sera introduite dans la machine à dessiner pour obtenir un tracé.

— **Usinage des outillages :**

Les mêmes bandes perforées permettent la fabrication des outillages d'emboutissage, sur machine à commande numérique.

8° Machine à contrôler

But : Contrôle en coordonnées rectangulaires (suivant X, Y, Z) ou en coordonnées polaires.

Mode opératoire : La description de la pièce est dans un ordinateur associé à la machine à mesurer. Un palpeur vient repérer, point par point, la géométrie à contrôler. L'ordinateur émet un rapport de contrôle (positions relevées, écarts par rapport à la position théorique).

Le taillage

Le taillage est l'ensemble des procédés qui permettent d'obtenir les dentures d'engrenages de toutes catégories, les arbres cannelés ou striés, les rochets, et, d'une façon générale, tous profils pour lesquels il est possible d'établir, théoriquement et pratiquement un outil conjugué (*fig.* 1 à 4).

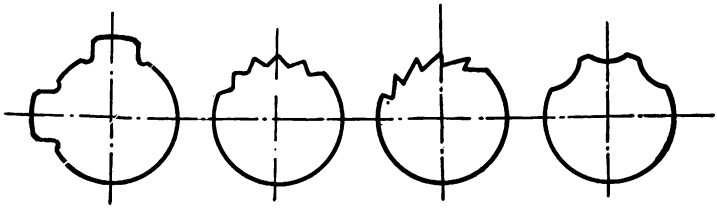


Fig. 1 à 4. — Profils pouvant être taillés par génération.

On distingue deux modes de taille :

a) par fraisage ou rabotage à l'outil de forme,

b) par génération : l'outil n'a pas la forme du profil interdent à obtenir, mais une forme « conjuguée », relativement simple à déterminer, surtout pour les profils à développante de cercle (théorie des roulantes et roulettes : voir *Mécanique*)

ÉTUDE DE PRINCIPE DU TAILLAGE DES ENGRENAGES.

Rappel de notions de cinématique.

Développante de cercle : C'est la courbe tracée par un point d'une droite Δ qui roule, *sans glisser,* sur une circonférence (*fig.* 5).

On a : $\overset{\frown}{AB_3} = \overline{B_3P}$

B_3P est la normale, et PT la tangente en P, à la développante.

B_3 est le centre instantané de rotation correspondant à B_3P.

Dans bien des cas, on peut substituer à un arc court de développante $\overset{\frown}{P_1P_2}$ un arc de cercle de centre B_3.

Pour représenter graphiquement la développante de cercle, il suffit d'enrouler sur un

disque de diamètre égal à celui de la circonférence développée, une cordelette à l'extrémité de laquelle est fixée la pointe d'un crayon. En maintenant tendue cette cordelette inextensible tandis qu'on la déroule, le crayon trace une développante de cercle. Toutes les développantes d'une même circonférence sont identiques.

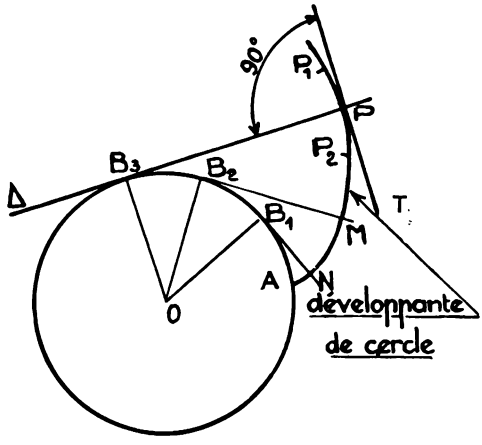


Fig. 5. — Génération de la développante de cercle.

Propriétés des profils conjugués.

Étude expérimentale.

Première expérience.

Nous avons exécuté, en carton, deux surfaces représentant deux cercles (O_1R_1) (O_2R_2) et une portion de leurs développantes C_1 et C_2 (*fig.* 6).

On place ces deux figures contre un tableau noir au moyen de punaises (ou de vis) servant d'axes de rotation O_1 et O_2.

Par des fils tendus on matérialise la droite O_1 O_2 et la tangente commune Δ aux cercles développés. Soit A le point d'intersection de ces deux droites.

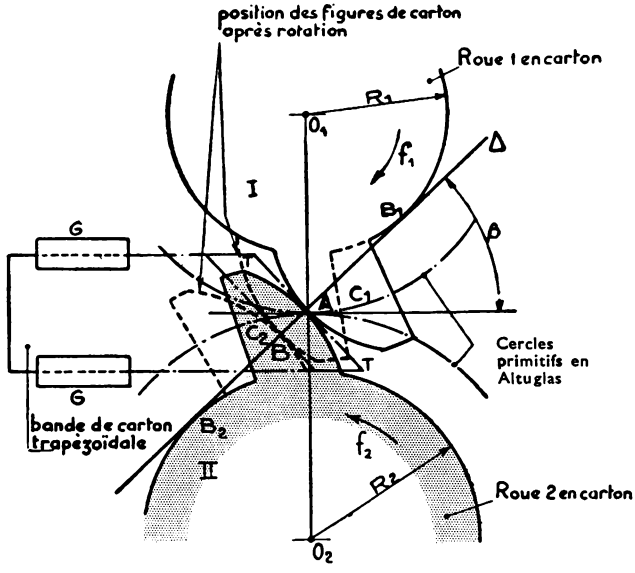


Fig. 6. — Étude expérimentale du profil à développante.

Mettons en contact les deux développantes : on constate que leur point commun A est situé sur Δ ; en outre, leur tangente en ce point est toujours perpendiculaire à Δ.

Il est possible de faire tourner la roue O_2 en rendant motrice la roue O_1. Plaçons sur les figures de carton deux disques d'altuglas de rayons O_1A et O_2A et rendons-les solidaires des roues en carton.

Mettons en mouvement la *figure* O_1 : les deux roues de plexiglas (altuglas) (1) roulent sans glisser l'une sur l'autre, tandis que les courbes C_1 et C_2 roulent en glissant l'une sur l'autre.

Si la vitesse de rotation de O_1 est constante, la vitesse de rotation de O_2 l'est aussi, et elles sont dans le rapport :

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{O_2A}{O_1A}.$$

Le principe du fonctionnement des engrenages est ainsi mis en évidence.

Deuxième expérience.

Enlevons la roue O_2 et montons sur des glissières G perpendiculaires à O_1O_2, une bande de carton trapézoïdale, dont le côté oblique T est perpendiculaire à Δ. En faisant tourner la roue O_1 la réglette est poussée et le point de contact de C_1 avec T reste situé sur Δ, la droite T étant constamment tangente au profil C_1.

Cette dernière constatation est la conséquence directe des propriétés de la développante de cercle.

Montons sur la bande de carton une réglette en altuglas tangente au disque de rayon O_1A. Si l'on fait tourner O_1, on constate que la roue O_1A roule sans glisser sur le bord de la bande de carton.

Si la vitesse de rotation de O_1 est constante, la bande de carton se déplace à vitesse constante :

$$V = \omega\, O_1A$$

Cette expérience illustre le principe de fonctionnement de l'ensemble pignon et crémaillère.

REMARQUES.

Les profils C_1, C_2, T, sont appelés profils conjugués.

Δ est la droite de poussée. L'angle β que fait Δ avec la normale à OA est l'*angle de pression.*

Les cercles de rayons O_1A et O_2A sont les cercles primitifs. Les cercles de rayons R_1 et R_2 sont appelés cercles développés ou cercles de base.

---

(1) Altuglas est le nouveau nom commercial du Plexiglas, matière thermoplastique fabriquée par une grande firme française. L'altulor est un polymétacrylate de méthyle.

LES ENGRENAGES

On appelle engrenage l'*ensemble* de deux roues dentées.

Les dentures d'engrenages sont normalisées (Norme n° E 23).

Examinons un engrenage droit et considérons la section de cet engrenage par un plan perpendiculaire aux axes de rotation (*fig.* 7).

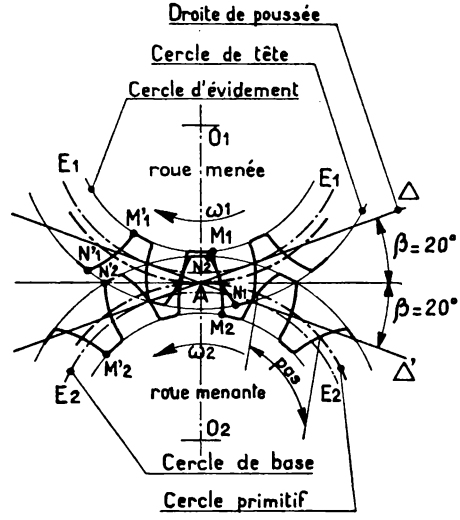


Fig. 7. — Engrenage à développante.

Les profils des roues dentées sont définis par les *cercles primitifs*. On a :

$$\frac{O_1A}{O_2A} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

Les droites de poussée Δ et Δ′, inclinées d'un angle de pression $\beta = 20°$, par rapport à la tangente commune aux circonférences primitives, permettent de déterminer les circonférences développées E_1 et E_2 qui leur sont tangentes.

La portion du profil de la dent où s'effectuent les contacts successifs porte le nom de *profil actif* (1).

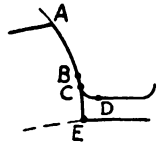


Fig. 7 bis.

Le profil entier de la dent (*fig.* 7 *bis*) n'est pas totalement utilisé pour la conduite; il comporte :

AB : profil actif.

AC : partie en développante d'origine E.

CD : profil de raccord.

AC et, mieux, AD serait en toute rigueur : l'odontoïde.

(1) L'ancien terme d'odontoïde, qui désignait toute la partie de la dent en forme de développante de cercle, est tombé en désuétude.

Étude expérimentale du glissement relatif de deux dents d'un engrenage cylindrique droit.

Utilisons comme matériel expérimental deux portions d'engrenage exécutées dans des cartons de couleurs différentes, piquées par leurs centres au tableau noir (*fig.* 8). Trois fils tendus représentent : la ligne des centres, la tangente commune aux circonférences primitives, et la droite de pression inclinée à 20° sur la tangente.

Sur la droite de pression (*fig.* 9), nous avons marqué les points 0 et 6, où l'engrènement commence et finit. La distance entre 0 et 6 a été divisée en six parties égales. Faisons

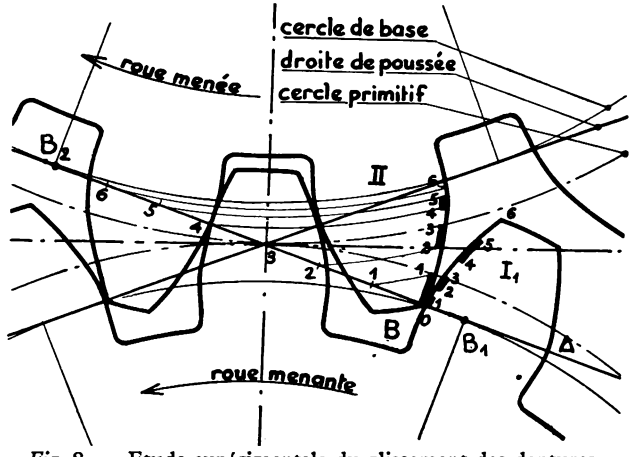


Fig. 8. — Etude expérimentale du glissement des dentures.

tourner les roues, et arrêtons-les chaque fois que le point de contact B passe au droit d'une division.

Quand B est en 1, le point de contact a parcouru sur le profil de la roue menante l'arc $\widehat{01}$, qui est beaucoup plus petit que l'arc $\widehat{01}$, parcouru sur celui de la roue menée. Ainsi, il y a eu glissement de la dent menée sur la dent menante.

Lorsque le point B passe sur la droite Δ, du point 5 au point 6, l'arc $\widehat{56}$ de la roue menante est beaucoup plus grand que l'arc correspondant du profil de la roue menée. La dent menante *glisse* sur la dent menée.

Quand le point B passe sur la droite Δ au voisinage du point 3, le glissement relatif des deux dents est beaucoup plus réduit (*fig.* 9).

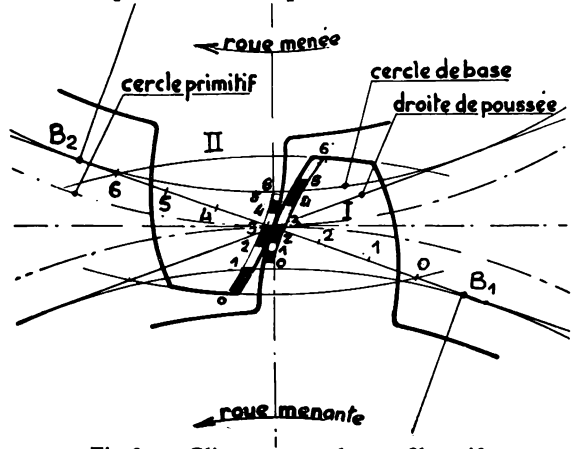


Fig. 9. — Glissement sur les profils actifs.

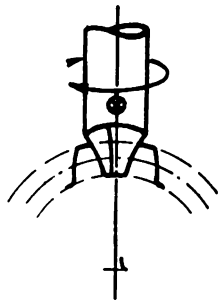


Fig. 10. — Taillage par fraise en bout.

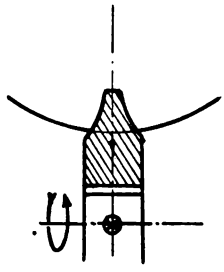


Fig. 11. — Taillage par fraise au module.

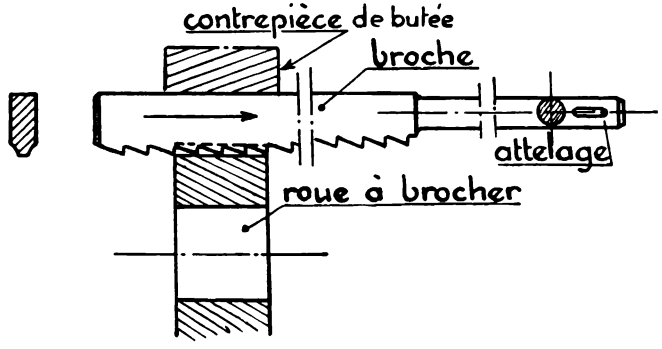


Fig. 12. — Taillage par broche.

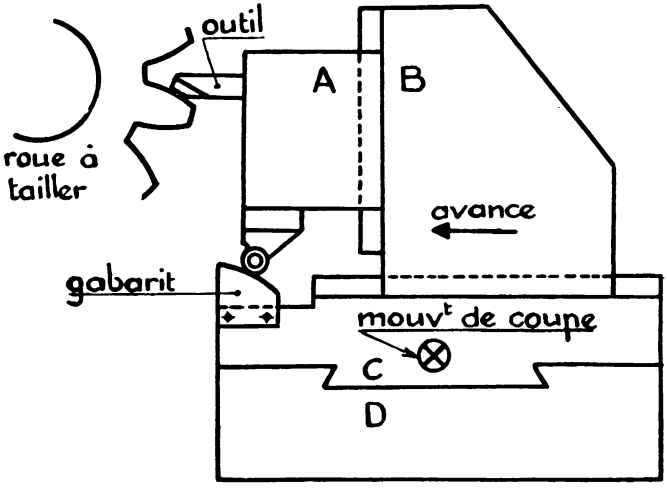


Fig. 13. — Machine à tailler par reproduction.
Le mouvement de reproduction est communiqué à l'outil par le gabarit de forme.

LES MÉTHODES DE TAILLAGE DES ENGRENAGES

1° Principales méthodes.

Pour transformer un cylindre en roue dentée, on taille des rainures limitées par le profil des dents.

a) Une première méthode qui vient naturellement à l'esprit, consiste à utiliser un outil de forme : une fraise, une meule, une broche (*fig.* 10, 11 et 12).

C'est le taillage à l'outil de forme par fraisage, meulage, ou brochage.

b) L'usinage des entre-dents peut être exécuté avec un outil astreint à suivre le profil des dents (*fig.* 13). Le mouvement de coupe est un mouvement de rabotage.

Ce procédé de taillage par reproduction est utilisé notamment pour usiner des engrenages coniques.

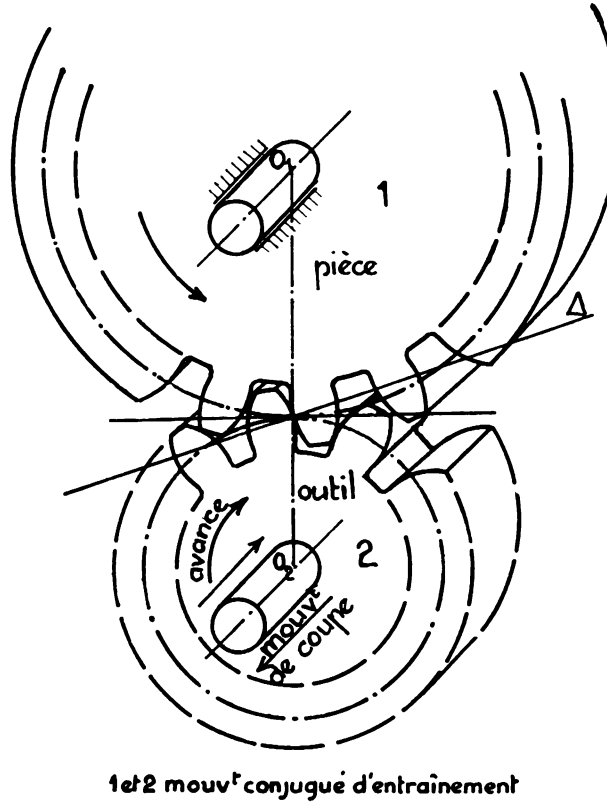


Fig. 14. — Taillage par engrènement : outil cylindrique.

c) Imaginons que l'on substitue à l'outil de rabotage représenté sur la *figure* 13, un outil ayant la forme d'une roue cylindrique, ou d'une crémaillère engrenant avec la roue à tailler. Le mouvement de reproduction communiqué précédemment à l'outil par le gabarit de forme, est remplacé par les mouvements conjugués d'engrènement de l'outil et du pignon à tailler (*fig.* 14, 15 et 15 *bis*).

Les mouvements conjugués sont, pour la pièce : une rotation, et, pour l'outil : une rotation s'il a la forme d'une roue, et une translation s'il a la celle d'une crémaillère.

Ces différents procédés d'usinage des dentures portent le nom de *taillage par engrènement*, ou *par génération.*

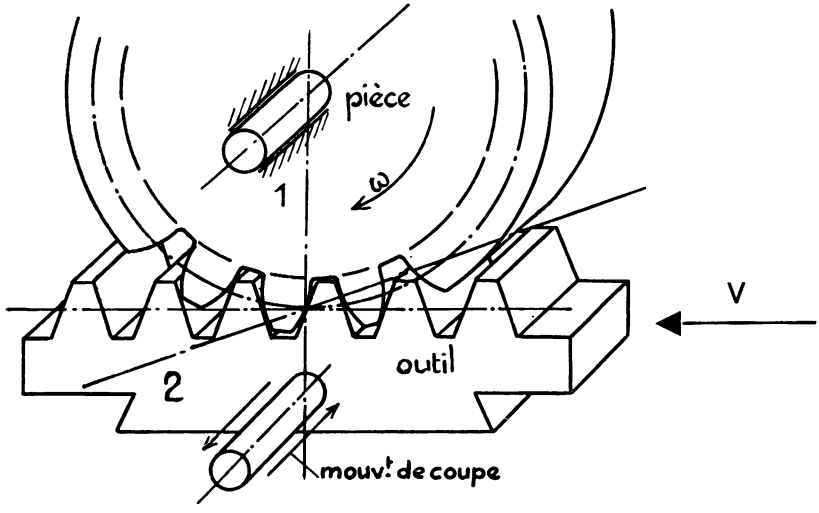


Fig. 15. — Taillage par engrènement : outil crémaillère.

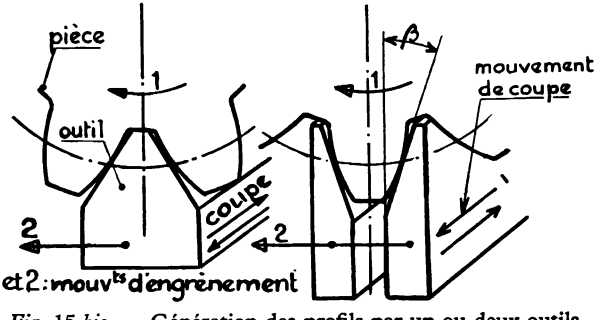


Fig. 15 *bis.* — Génération des profils par un ou deux outils.

2° Principe du taillage par engrènement.

Il est intéressant de montrer expérimentalement que les arêtes tranchantes de l'outil engendrent la surface des flancs des dents usinées si la pièce en œuvre et l'outil sont animés de mouvements assurant leur engrènement.

Reprenons les deux portions d'engrenage en carton dessinés sur la *figure* 6. Montons-les sur le tableau : sur la roue I, nous montons un disque de carton ayant un diamètre égal à celui de l'extérieur de la roue I, et qui va représenter la pièce à usiner (*fig.* 16). La roue et le disque sont rendus solidaires.

De même, montons sur la roue II une roue II′ identique, en carton, qui représentera l'outil. Les roues I et II communiqueront à la pièce et à l'outil le mouvement d'engrènement. En faisant tourner, on peut, sur le disque, tracer avec un crayon les positions successives de la roue dentée figurant l'outil.

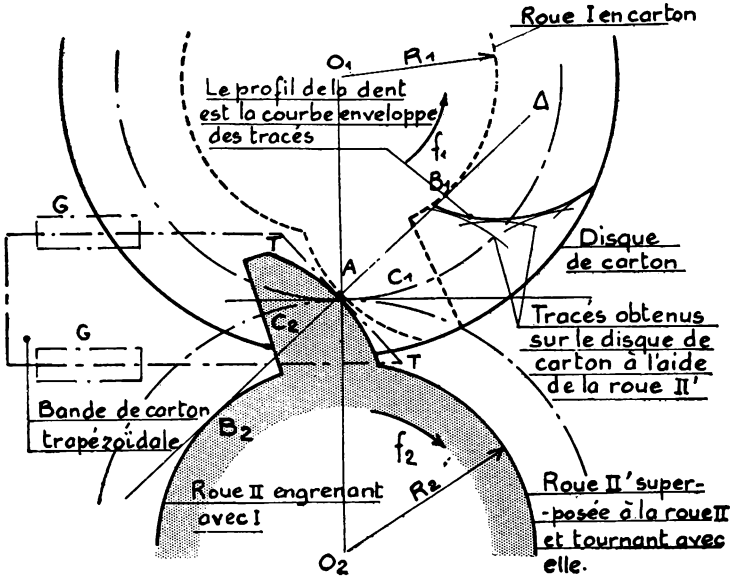


Fig. 16.

On voit alors que l'enveloppe des différentes positions de l'outil est le profil de la denture taillée.

Nous avons mis ainsi en évidence le principe du taillage par outil-pignon.

On trouverait un résultat analogue en exécutant un dispositif expérimental dans lequel on substituerait aux roues II et II′ deux crémaillères identiques. La génération de la dent est aussi réalisée par engrènement.

C'est le principe du taillage par outil-crémaillère.

Formes diverses de l'outil-crémaillère :

On remarque, en étudiant le taillage par engrènement, qu'une dent de l'outil, et notamment de la crémaillère, ne taille qu'une seule dent. Si l'on veut tailler la roue entièrement dent par dent, on peut utiliser des outils plus simples (*fig.* 15 *bis*) :

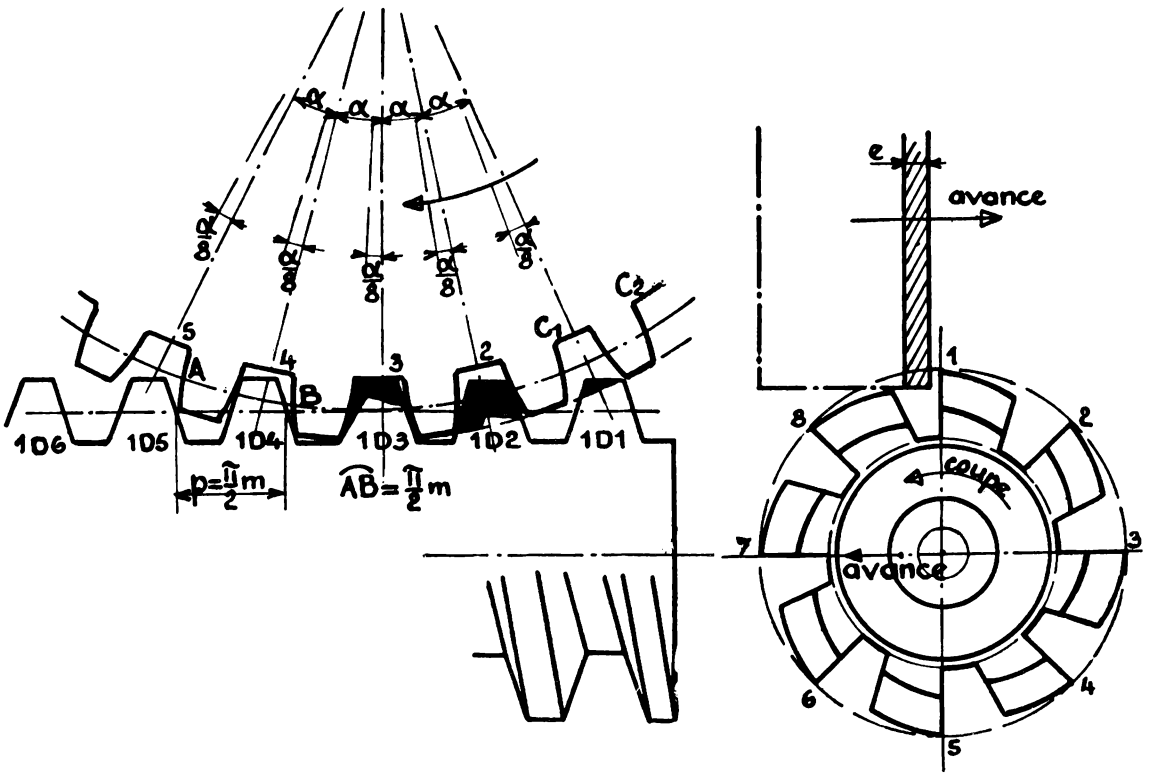


Fig. 17. — Taillage d'une roue par vis-fraise.

un outil au profil d'une dent de crémaillère ou deux outils taillant les deux flancs d'une même dent (technique utilisée pour tailler les roues coniques uniquement).

L'outil-crémaillère décrit jusqu'à présent est animé d'un mouvement de coupe rectiligne alternatif. Si on imagine qu'on lui communique un mouvement de coupe circulaire, l'outil-crémaillère devient la vis-fraise. On obtient ainsi un nouveau procédé de taille par engrènement : le taillage par vis-fraise.

3° Principe du taillage par vis-fraise.

L'outil est une vis dont le filet a le profil de la crémaillère capable d'engréner avec la roue à tailler. S'il s'agit d'une denture à développante de cercle, le filet est trapézoïdal. Dans cette vis, on exécute des rainures qui créent ainsi plusieurs outils-crémaillères. Sur la *figure* 17 la vis-fraise comporte huit séries de dents qui vont jouer, vis-à-vis de la pièce, le rôle de huit crémaillères venant successivement en contact avec elle.

Si la vis a un seul filet par pas, la roue doit tourner d'un angle α correspondant à une dent quand la vis fait un tour.

Imaginons que la vis ne possède que la seule rangée de dents 1 (les autres ayant été enlevées), et que la roue est de faible épaisseur *e*. Suivons le trajet du creux C_1 à tailler. La dent 1 D_1 enlève dans la roue la partie de métal ombrée sur la figure.

La roue fait un tour, la pièce tourne de l'angle α, et C_1 occupe la position 2, en face de la dent 1 D_2 qui enlève le métal ombré.

Un tour après, C_1 occupe la position 3, et se trouve en face de la dent 1 D_3 ; et ainsi de suite, jusqu'au 5e tour où le creux est entièrement taillé.

Le creux suivant, C_2, serait taillé de la même façon que C_1, mais avec un tour de vis de retard : par exemple, quand C_1 entre en contact avec ID_2, le creux C_2 subit son premier taillage par la dent ID_1.

La fraise à une dent présente les inconvénients suivants :

— les dents 1 D_1 - 1 D_2 - 1 D_3, doivent enlever une grande quantité de métal,

— les dents laissent sur les flancs des sillons importants.

Les conditions de travail sont nettement améliorées par l'action des autres lignes de dents 2, 3, 4,... 8. Les dents 2D entreront en action lorsque la roue aura tourné de l'angle $\frac{\alpha}{8}$.

Pour la position 3, par exemple, le creux taillé et la dent $2D_3$ occuperont l'un par rapport à l'autre une position différente de toutes celles obtenues par les dents ID. On conçoit ainsi que les flancs des dents taillées aient une forme beaucoup plus régulière.

Nous avons supposé que la roue à tailler était un disque mince ; pour réaliser la taille sur une épaisseur donnée, il suffit de communiquer un mouvement d'avance soit à la fraise, soit à la pièce.

Un appareil didactique exécuté en bois massif, contreplaqué et métal, permet de faire comprendre rapidement le principe de la taille à la fraise (*fig.* 18).

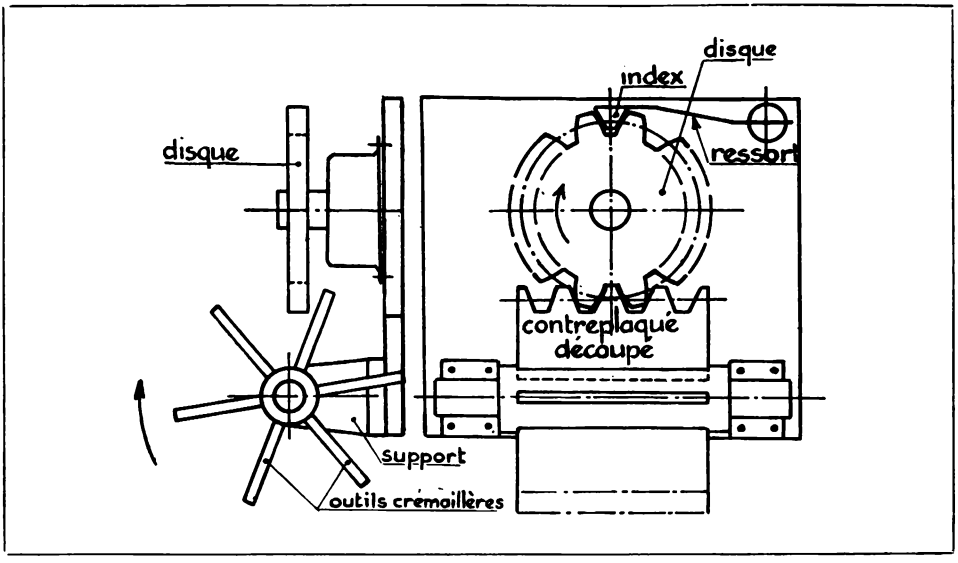


Fig. 18. — Appareil didactique pour étude de la vis-fraise.

RÉALISATION DU TAILLAGE DES ROUES CYLINDRIQUES A DENTURE DROITE OU HÉLICOIDALE

I. - TAILLAGE PAR OUTIL DE FORME

Taille par fraise au module.

L'outil est une fraise roulante (*fig.* 19) à profil constant et denture détalonnée ; le profil des dents (*fig.* 20) est approché : un arc de circonférence remplace la développante de cercle théorique. On utilise le plus souvent cette fraise sur une machine à fraiser horizontale. La pièce est généralement montée entre les pointes d'un diviseur (voir *Cours de fraisage*).

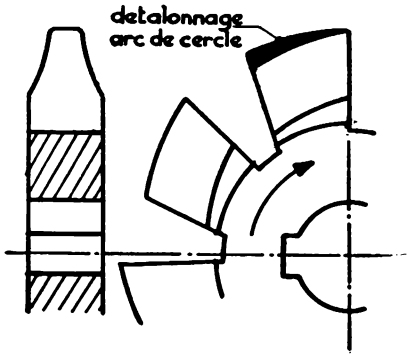


Fig. 19 — Fraise au module (détalonnée).

C'est le procédé employé dans les ateliers d'entretien et de mécanique générale, pour les pièces de rechange. La précision est fonction :

de celle de l'outil,

du soin dans le réglage de la roue par rapport à la fraise.

Le procédé est lent et exige la présence de l'opérateur pour effectuer la division.

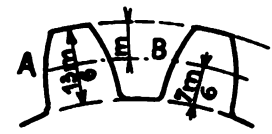


Fig. 20. — Hauteur d'une dent à développante.

Il existe des machines à diviseur automatique : machine Brown et Sharpe, par exemple ; on la règle pour la première dent et le travail se poursuit seul jusqu'à la dernière. La fraise est mise en place aussi rapidement que sur une machine à fraiser horizontale ; le réglage de la division est facile. On peut donc employer ce procédé même pour une pièce unique, et surtout pour les petites séries.

La fraise au module est simple, on la trouve toujours en stock dans tout bon atelier de construction mécanique.

Théoriquement, il faudrait une fraise particulière pour tailler tout engrenage d'un module et d'un nombre de dents déterminés. Pratiquement, on dispose, pour chaque module, d'une série de 8 ou de 15 fraises ; chacune de celles-ci sert à tailler tous les engrenages dont le nombre de dents est compris dans un intervalle déterminé.

Le taillage hélicoïdal est effectué avec le même outil si l'on communique à la pièce un mouvement hélicoïdal, et si l'on incline la fraise suivant la tangente à l'hélice primitive. Ce taillage peut être réalisé sur les machines à tailler ou sur les fraiseuses à tête universelle ou à table orientable, la roue étant montée sur un diviseur.

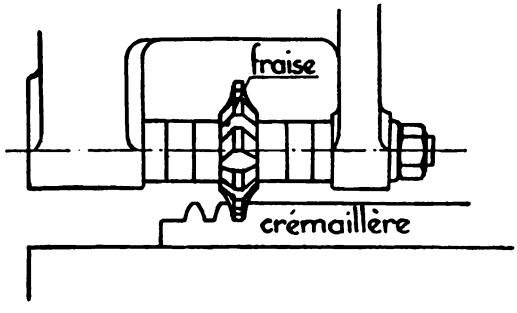


Fig. 21. — Appareil pour fraiser les crémaillères.

Taillage des crémaillères.

La fraise est montée sur la broche d'une tête amovible spéciale dont on équipe la fraiseuse. On monte un dispositif diviseur sur la vis du chariot longitudinal pour passer d'une dent à la suivante (*fig.* 21) (1).

Il existe des machines spéciales à division automatique pour le taillage des crémaillères.

Taille par fraise en bout.

Pour les gros modules, peu demandés, une fraise roulante à profil constant serait trop chère. On utilise alors une fraise en bout (fraise « bouchon ») (*fig.* 22).

On l'emploie surtout sur de grosses machines à tailler à division automatique (Pfauter, par exemple), où la broche porte-fraise est horizontale et la roue couchée (son axe est vertical).

(1) Voir « Fraisage » de ARNAUD et ROLLET, Foucher, Editeur.

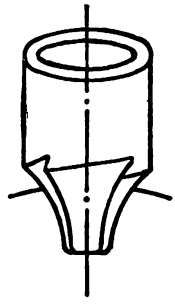


Fig. 22. — Fraise en bout.

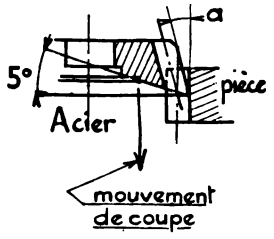


Fig. 24. — Couteau Fellows.

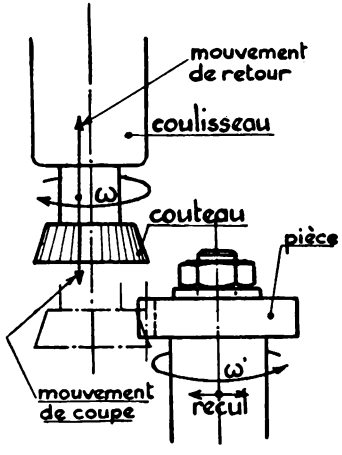


Fig. 25. — Taillage sur machine Fellows.

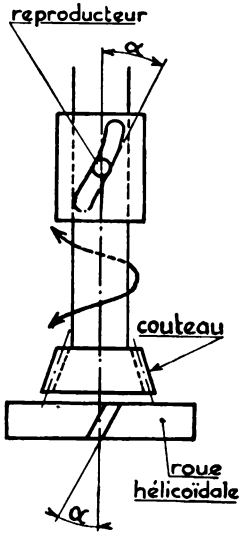


Fig. 26. — Taillage hélicoïdal sur machine Fellows.

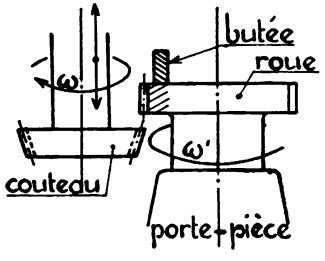


Fig. 27. — Taillage en tirant.

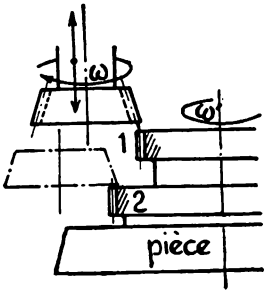


Fig. 28. — Taillage en poussant.

Le procédé est long, car la fraise est fragile et a peu de dents ; le dégagement des copeaux est mal assuré. On peut tailler ainsi jusqu'au module 15, et même au-delà. On effectue la taille dent par dent : une passe d'ébauche et une de finition. C'est la fraise qui se déplace parallèlement à l'axe de la roue.

II. - TAILLAGE PAR ENGRÈNEMENT

● Emploi de l'outil-pignon.

L'outil a la forme d'une roue à denture dépouillée et les dents-outils sont à profil constant ; leur forme, en section, est identique à celles des dents de la roue de même diamétre et de même module. C'est Fellows (U.S.A.) qui a créé ce procédé.

La machine ressemble à une mortaiseuse ; l'outil est animé d'un mouvement rectiligne alternatif combiné avec un mouvement de rotation continue autour de son axe (voir *fig.* 31). Au début, ni l'outil, ni la pièce ne tournent, mais l'outil, d'abord tangent à cette dernière, s'en rapproche à chaque coup jusqu'à ce qu'il atteigne le fond de la dent. A ce moment les rotations conjuguées de la pièce et de l'outil commencent, le rapport des vitesses est :

$$\frac{\omega}{\omega'} = \frac{Z'}{Z} = \frac{\text{nombre de dents à tailler}}{\text{nombre de dents du pignon}}$$

La liaison pièce-outil est « positive ».

En général on fait une passe d'ébauche et une de finition ; le passage de l'une à l'autre s'effectue automatiquement, et, en deux tours, la roue est taillée.

On emploie un seul couteau par module. Les couteaux ont une pente d'affûtage de 5° (*fig.* 24). L'outil est un pignon à dents droites pour tailler une roue droite (*fig.* 25).

Pour tailler les dentures hélicoïdales, on utilise un outil à denture hélicoïdale. En plus des mouvements de génération, il est alors nécessaire de donner à l'outil un mouvement de rotation de façon que ses dents engendrent la surface hélicoïdale désirée. Cette rotation est obtenue au moyen d'un reproducteur agissant à l'extrémité de la broche (*fig.* 26 et 31). Il faut un reproducteur par angle d'hélice. L'outil peut travailler en tirant ou en poussant ; la première solution est préférable car on évite la flexion du porte-outil par flambage, mais elle n'est pas toujours possible (*fig.* 27-28). Pendant le retour de l'outil, la pièce recule légèrement pour éviter le frottement du couteau. Ce procédé permet de tailler des roues intérieures jusqu'à un diamètre voisin de celui du couteau et c'est le seul possible (*fig.* 29).

Sur une machine FELLOWS, on peut également tailler des roues à chevrons (*fig.* 30).

Avec ce procédé, la précision est fonction de celle de l'outil, d'ailleurs difficile à construire. C'est un procédé rapide qui permet de tailler toutes les dentures droites et hélicoïdales. Il est extrêmement répandu.

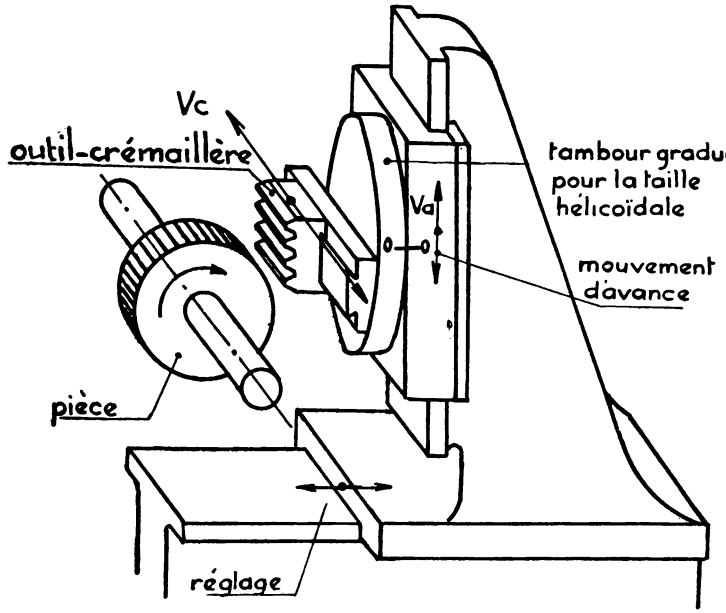


Fig. 35. — Machine Sunderland.

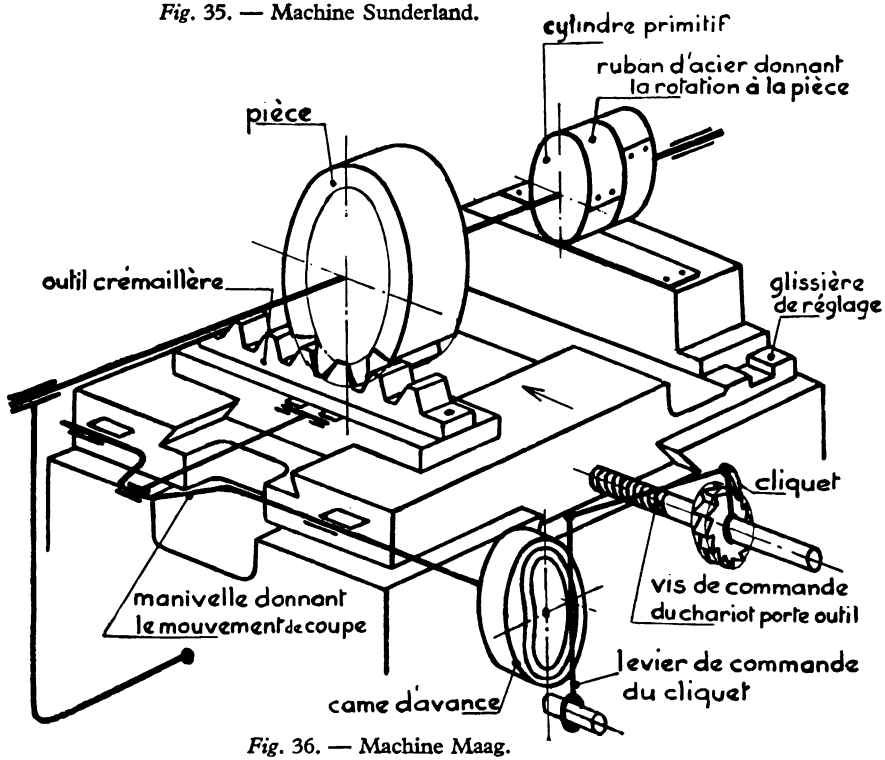


Fig. 36. — Machine Maag.

Les machines.

Le schéma de la machine est donné sur la *figure* 31. L'outil-pignon est monté sur un arbre vertical. Il reçoit le mouvement de coupe alternatif d'un fourreau-crémaillère. Les rotations conjuguées de l'outil et de la pièce sont communiquées aux arbres par pignons et vis sans fin. Un moyeu claveté sur l'arbre vertical transmet le mouvement de rotation à l'outil. Mais il peut aussi, lorsque les rampes du reproducteur sont hélicoïdales, communiquer un mouvement hélicoïdal à l'outil : taillage hélicoïdal.
Pour la taille droite, les rampes du reproducteur sont planes et verticales. Les glissières du moyeu le sont aussi.

Les principales machines sont construites par Herbert, Fellows, Reinecker, Lorenz et, en France : Fellow-France (G.S.P. constructeur).

Productivité.

La vitesse de coupe admise est de 12 m/mn pour le travail des aciers $(R_r)_e = 450$ N/mm² (1) et la fonte, et 10 m/mn pour l'acier $(R_r)_e = 750$ N/mm².

La course de l'outil, se détermine ainsi :

$$l = \text{largeur de dent} + 2 \text{ fois } 3 \text{ à } 4 \text{ mm.}$$

Le nombre de courses de l'outil par minute est :

$$n = \frac{V}{2l} \qquad (V \text{ en m/mn et } l \text{ en m}).$$

L'avance est définie, sur la plupart des machines, par le nombre de courses, par centimètre de diamètre de roue à tailler, nécessaires pour exécuter une passe sur toute la roue. Cette avance A varie de 200 à 100 courses par centimètre de diamètre de roue. Le grand nombre de courses est évidemment réservé aux passes de finition.

Si la roue a un diamètre primitif de D cm, le nombre total de courses est égal à $A \times D$.

Le temps pour une passe est donc, en minutes :

$$t = \frac{AD}{n}$$

Le temps nécessaire pour amener le couteau à fond de dent se calcule en prenant une avance par coup de 0,02 à 0,03.

$$t_1 = \frac{2{,}15\ M}{0{,}03\ n} \qquad (M : \text{module en mm}).$$

Le temps de préparation de la machine est d'environ 30 à 40 mn.

On arrive à tailler un pignon de 25 dents, en deux passes, module 2,5, en acier NiCr, en 7 mn. Ce temps peut être diminué encore si l'on monte sur le support de pièce une série de pignons à tailler identiques.

---

(1) Rappelons que 1 kgf/mm² ≃ 10 N/mm².

● Emploi de l'outil-crémaillère.

L'outil.

C'est un outil de rabotage ; son profil est celui d'une crémaillère engrenant avec la roue à tailler (*fig.* 32). Il est à profil constant, et détalonné. Les dents sont des trapèzes isocèles pour le taillage des profils en développante.

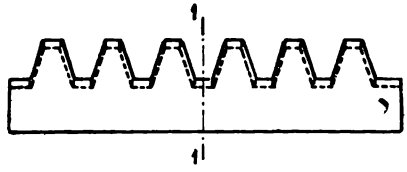


Fig. 32. — Outil crémaillère.

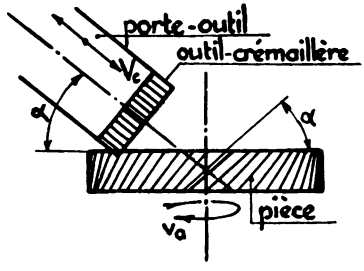


Fig. 34. — Taillage d'une roue hélicoïdale sur Sunderland.

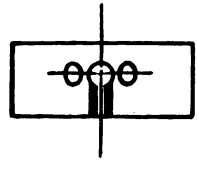


Fig. 34 *b.* — Taillage interrompu.

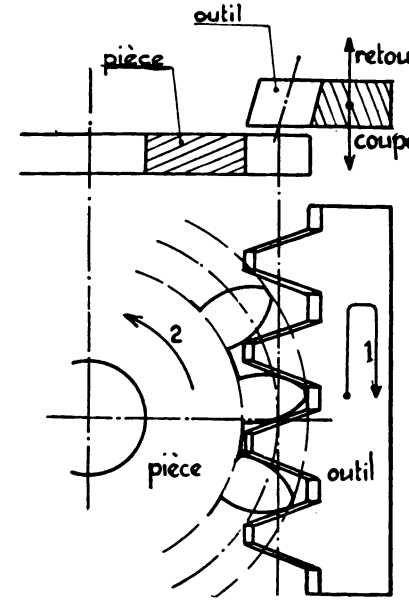


Fig. 33. — Principe de la machine Sunderland.

Sur la machine Sunderland, l'outil est animé d'un mouvement rectiligne alternatif à la vitesse de coupe, et d'un déplacement lent, perpendiculaire, pour réaliser l'avance-génération. Ce mouvement s'effectue suivant 1, à vitesse égale à la vitesse circonférentielle d'un point situé sur la circonférence primitive de la roue (*fig.* 33).

C'est la synchronisation de ces deux mouvements, translation de la crémaillère, rotation de la pièce, qui engendre le profil de la denture. Toutefois le mouvement d'avance ne peut durer longtemps, car l'outil quitterait la pièce. Lorsque le déplacement atteint la valeur du pas circonférentiel ($\pi \times M$), l'outil recule pour se dégager, revient à sa position de départ, et le cycle recommence.

Sur les machines du type MAAG, c'est le chariot porte-pièce qui se déplace, s'immobilise puis recule pour assurer la division : l'outil ne possède que le mouvement de coupe.

Le cycle de travail est le suivant :

1° l'outil est amené tangent à la pièce,

2° l'outil est engagé progressivement jusqu'à fond de dent (en taillant),

3° la génération (mouvements conjugués) s'effectue,

4° l'outil est dégagé,

5° l'outil (ou la pièce) revient au point de départ,

puis le cycle recommence.

Le même outil permet de tailler toutes les roues de même module, droites ou hélicoïdales. Pour exécuter ces dernières, on incline l'outil suivant la tangente à l'hélice (*fig.* 34) les réglages sont effectués en considérant le pas apparent.

Avec l'outil-crémaillère, on peut tailler des pignons contre épaulement et, avec deux outils, des roues à chevrons. Il est possible aussi d'exécuter des roues dont les dents ne débouchent pas, à condition de percer autant de trous que de dents pour assurer le dégagement du copeau (*fig.* 34 *b*). Par contre, on ne peut pas tailler de roues intérieures.

Les machines.

Il existe deux types de machines : la machine Sunderland et la machine Maag.

Dans la machine Sunderland, les mouvements conjugués de génération sont obtenus grâce à un ensemble d'arbres et de pignons judicieusement choisis (*fig.* 35).

Dans la machine Maag, les mouvements conjugués de génération sont obtenus à l'aide d'un cylindre de diamètre égal au diamètre primitif de la roue à tailler, qui roule sur un plan contenant le plan primitif de l'outil-crémaillère. On élimine tout glissement dans ce roulement en liant le cylindre, à deux bandes métalliques enroulées en sens inverse, et fixées au plan de roulement (*fig.* 36).

Productivité.

Voici quelques résultats qui donnent une idée de la rapidité de travail sur ces machines. Pour tailler des engrenages en acier mi-dur, de largeur égale à dix fois le module, il faut compter un temps d'usinage de 42 s par dent si le module est 1 ; 75 s si le module est de 4, et 240 s si le module est de 10.

module	s	42 secondes
—	4	75 —
—	10	240 —

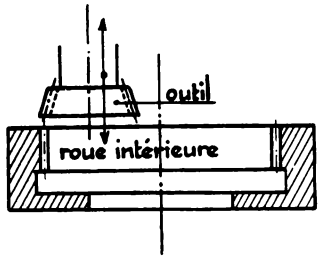


Fig. 29. — Taillage d'une roue intérieure.

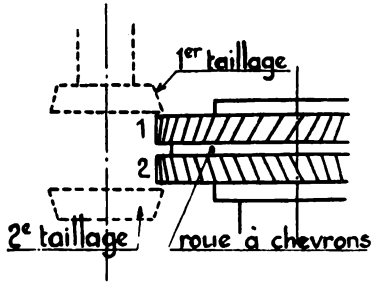


Fig. 30. — Taillage d'une roue à chevrons.

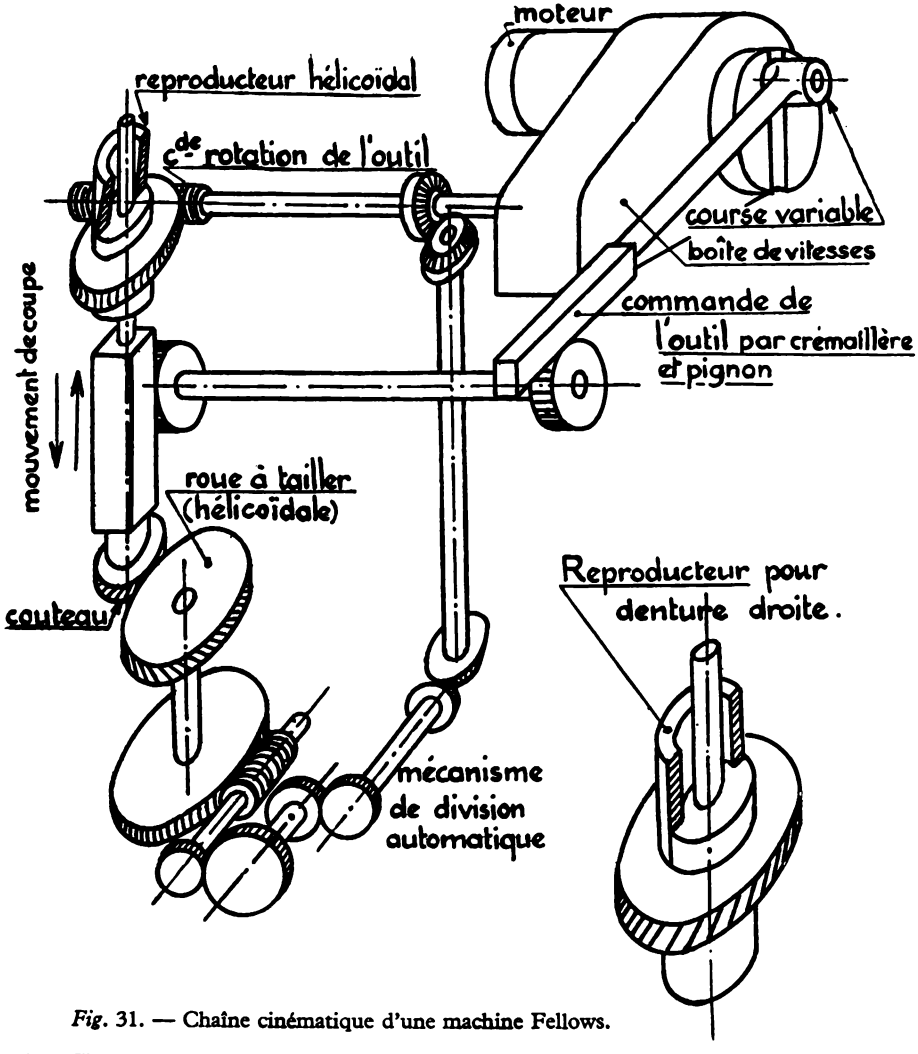
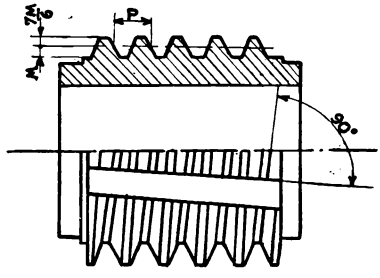


Fig. 31. — Chaîne cinématique d'une machine Fellows.

● Emploi de la vis-fraise.

L'outil.

L'outil est une vis à filet trapézoïdal dans le cas des profils à développante de cercle ; des rainures y sont taillées pour former des dents. On l'appelle parfois fraise-mère. Ces rainures sont hélicoïdales et leur hélicoïde est perpendiculaire à celui de la vis.



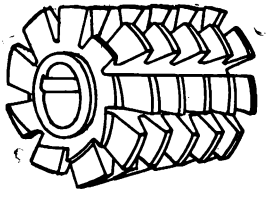


Fig. 37-37 *b.* — Vis-fraise.

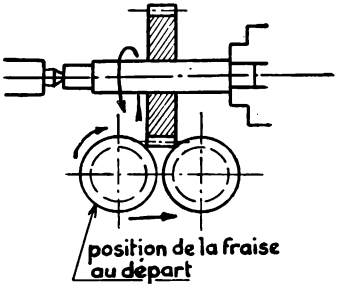


Fig. 38. — Taille avec vis-fraise.

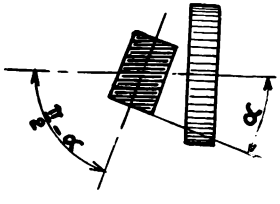


Fig. 39. — Taille par vis-fraise, roue droite.

Pour chaque module il faut un outil particulier. Il est à flancs rectilignes, relativement facile à construire, mais il doit être affûté avec beaucoup de soin sur une machine munie d'un reproducteur hélicoïdal au pas des rainures (*fig.* 37 *a*-37 *b*).

Pendant le taillage, la pièce tourne à la vitesse que lui donnerait la vis dans le système vis et roue tangente correspondant. L'outil entre en contact progressivement et travaille comme le montre la *figure* 38.

La vitesse de la fraise est mathématiquement liée à celle de la roue grâce à une chaîne cinématique sans lien glissant, c'est-à-dire positive (engrenages et vis). Cette liaison est dite *desmodromique* (desmos = lien ; dromos = course).

La vis-fraise est un outil à profil constant ; il est détalonné. On le construit en acier à coupe rapide supérieur. Une vis-fraise à droite (sens de l'hélice) permet de tailler des roues droites ou hélicoïdales.

Pour le taillage droit on incline l'axe de la fraise d'un angle égal à celui de la tangente à l'hélice des dents de l'outil (*fig.* 39).

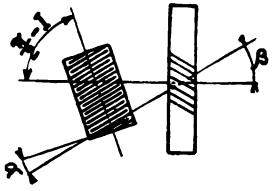


Fig. 40*a*. — Taillage par vis-fraise, roue à droite.

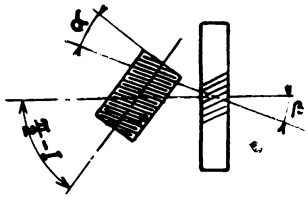


Fig. 40*b*. — Taillage par vis-fraise, roue à gauche.

Si l'on veut tailler une roue hélicoïdale à droite, l'angle I d'inclinaison de la fraise est donné par la relation :

$$I = \beta - \alpha \text{ (}fig.\text{ 40 } a \text{ et } b\text{)}$$

β : angle d'inclinaison des dents de la roue,

α : angle d'inclinaison des dents de la fraise.

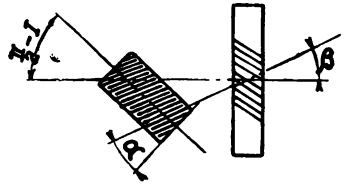


Fig. 41. — Taillage par vis-fraise, roue à droite.

L'angle α de la fraise est toujours faible : 2 à 3°. L'angle β peut varier de 0 à 45°.

On se rend compte aisément que l'on peut aussi bien utiliser une vis-fraise à gauche (voir *fig.* 41). Pour des raisons techniques dont l'exposé sortirait du cadre de cet ouvrage, on conseille :

vis à droite pour tailler une roue à droite,

vis à gauche pour tailler une roue à gauche.

Liaison vis-fraise-pièce.

L'ensemble outil-pièce, pendant le travail, constitue un véritable « engrenage » roue hélicoïdale et vis (système réducteur de vitesse).

Avec une vis à un filet et une roue de z dents, le rapport de réduction est :

$$\frac{\text{vitesse de la roue}}{\text{vitesse de la vis}} = \frac{1}{z}$$

Mais on peut employer des vis à deux ou trois filets pour lesquelles l'angle α croît ; ces fraises sont utilisées pour tailler des hélices très prononcées ; elles sont difficiles à construire, car il faut que les filets soient rigoureusement identiques.

Le rapport des vitesses est alors :

$$\frac{\text{vitesse de roue}}{\text{vitesse de vis}} = \frac{2 \text{ ou } 3}{z}$$

Ces fraises produisent plus que celles à un seul filet puisque, pour une même vitesse de coupe (vitesse de la vis), la vitesse de la roue est doublée ou triplée. Aussi sont-elles employées pour les travaux d'ébauche.

Taillage hélicoïdal.

Le rapport des vitesses n'est plus égal à $\frac{1}{z}$ si la vis est à 1 filet, ou à $\frac{2 \text{ ou } 3}{z}$ si la vis a 2 ou 3 filets. Par exemple, la rotation doit être accélérée, si l'hélice de la roue est à

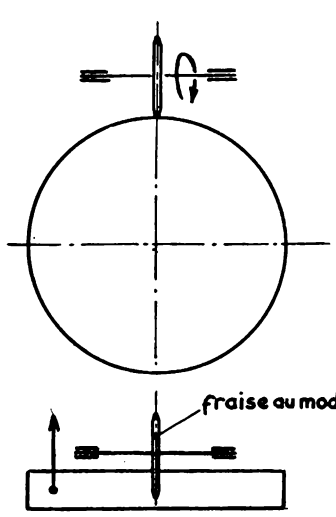


Fig. 42. — Taillage droit avec fraise-module.

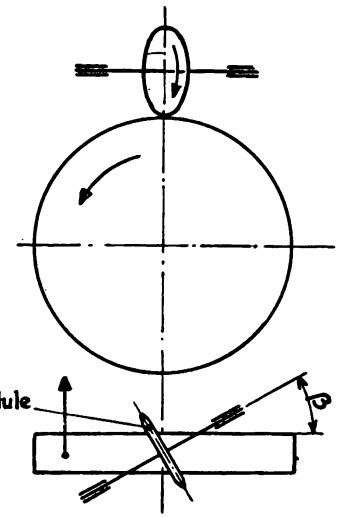


Fig. 43. — Taillage hélicoïdal avec fraise-module.

droite et si la vis-fraise est également à droite. Pour réaliser cette accélération on emploie une machine équipée d'un différentiel.

Essayons d'expliquer cela :

Considérons une *roue droite (fig .42)* et une *fraise au module* (nous la stylisons par un disque plan). Pendant le taillage de chaque dent, la roue n'est pas en rotation. Pour passer d'une dent à la suivante, on effectue la division à l'aide d'un diviseur commandé manuellement pour faire tourner la roue de 1.

Pour tailler une *roue hélicoïdale*, il faut faire tourner la pièce pendant l'avance relative outil-pièce (voir *Cours de fraisage*). La roue ferait un tour complet pour un déplacement de son support égal au pas de l'hélice à produire. On passe d'une dent à la suivante par une opération manuelle.

Avec une *vis-fraise*, la division devient *automatique et continue* (engrènement de génération) ; pour tailler une roue hélicoïdale de même caractéristique, le mouvement de division automatique reste le même *pour une roue droite*, mais il faut le compléter par une rotation supplémentaire, *positive ou négative* selon le sens de l'hélice que l'on veut obtenir. C'est le différentiel qui permet cet apport de vitesse, comme sur les roues motrices d'une automobile en virage.

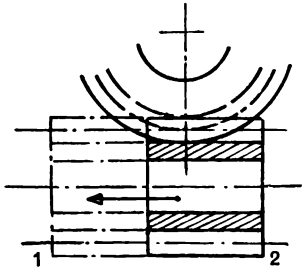


Fig. 44. — Déplacement axial de la fraise.

Déplacement axial de la vis fraise (shifting)

Si l'on examine une vis de fraise en cours de travail, on s'aperçoit que seules les dents de la partie centrale coupent, surtout si la pièce est de petit diamètre. Cela contraint à démonter fréquemment la fraise pour la réaffûter : c'est coûteux et, par surcroît, on meule des dents qui n'ont pas travaillé. Il est donc économique de déplacer périodiquement la fraise parallèlement à son axe pour l'amener, par étapes successives, de la position 1 à la position 2. Ce déplacement est automatique sur les machines récentes, grâce à un *mouvement épicycloïdal* très lent. Généralement, la vis-fraise passe de la position 1 à la position 2 en 8 heures (*fig.* 44).

Mode de coupe de la fraise.

La fraise peut travailler en poussant (direction de I vers II), ou en avalant (direction de II vers I, *fig.* 45). On constate que le fini est meilleur avec le second procédé, qui exige d'ailleurs des dispositifs spéciaux, notamment pour le rattrapage du jeu de la vis de table porte-outil. Le fraisage en avalant est surtout intéressant pour la finition.

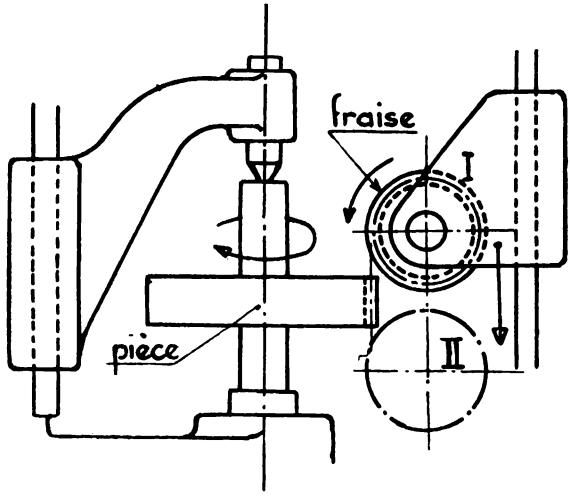


Fig. 45. — Schéma d'une machine G.S.P.

Sur les machines qui le permettent (G.S.P. par exemple), l'ébauche peut être faite à gros copeaux en poussant et la finition à petits copeaux, en « avalant ». On évite ainsi

le temps mort qui serait nécessaire pour ramener la fraise en position de départ. En outre, il est possible d'augmenter l'avance par tour pour la deuxième passe tout en obtenant un état de surface satisfaisant (*fig.* 45).

Les machines.

On construit actuellement deux types de machines. Sur tous les deux, la fraise est animée du mouvement de coupe et d'avance, et la pièce, portée par un chariot, est réglable en position (*fig.* 46 *a* et 46 *b*). Elles ne diffèrent que par la position du support

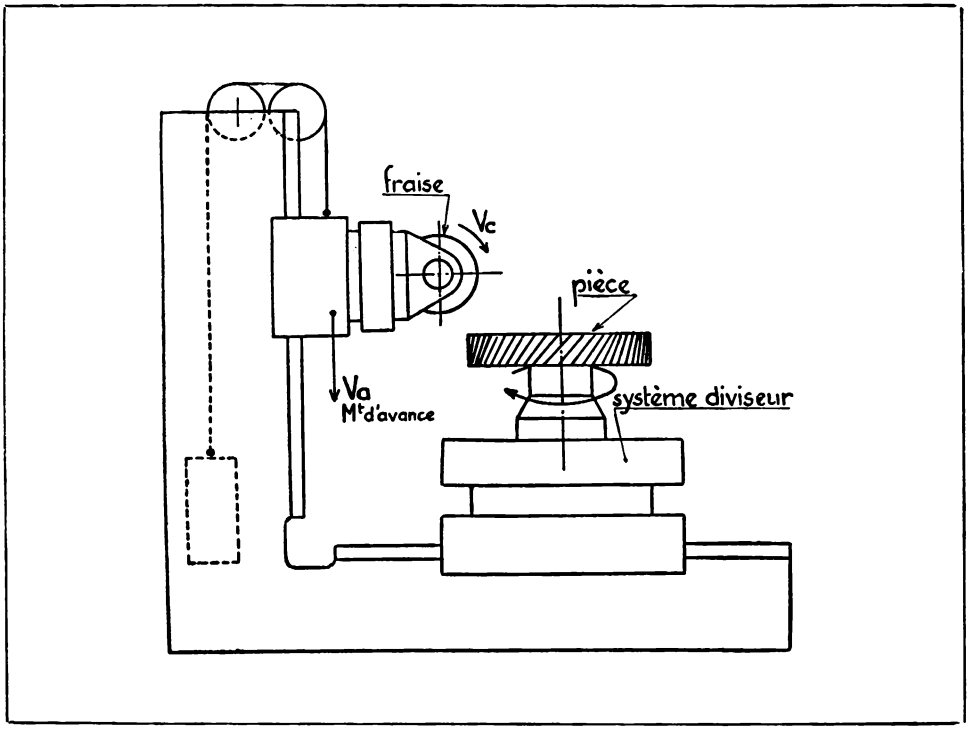


Fig. 46 *a.* — Machine à tailler par vis-fraise : schéma.

de fraise, tantôt disposé sur le chariot à mouvement vertical, tantôt sur le chariot horizontal (*fig.* 46 *a*-46 *b*-47).

La *figure* 48 donne la chaîne cinématique d'une machine G.S.P. Elle précise la position du différentiel permettant de donner accélération ou retard dans la rotation de la pièce quand celle-ci est une roue hélicoïdale.

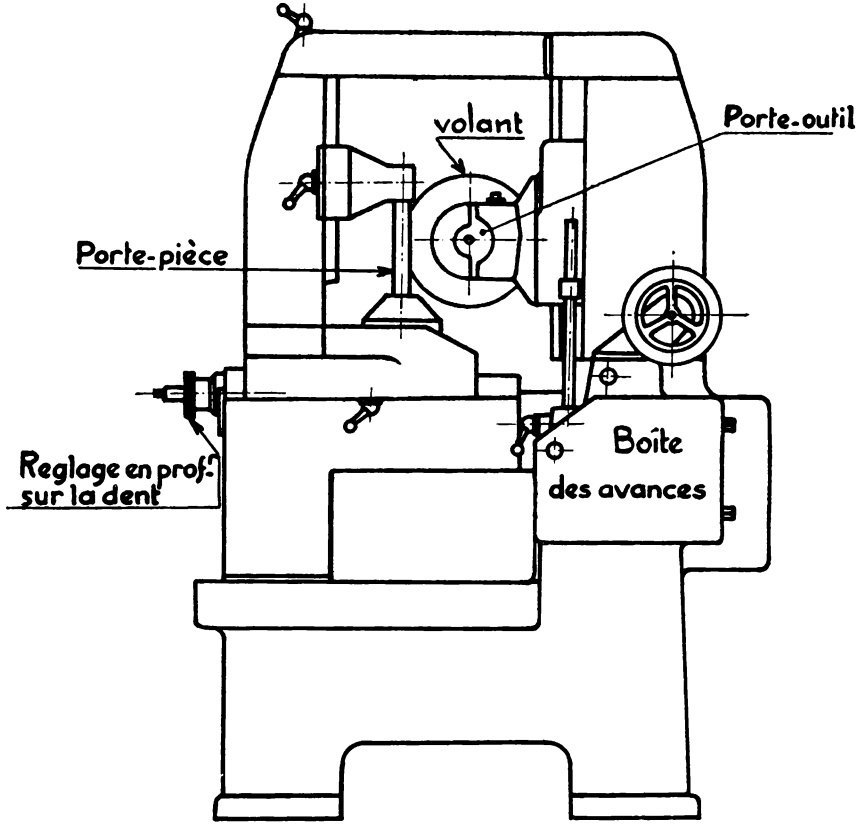


Fig. 46 *b.* — Machine à tailler par vis-fraise (silhouette).

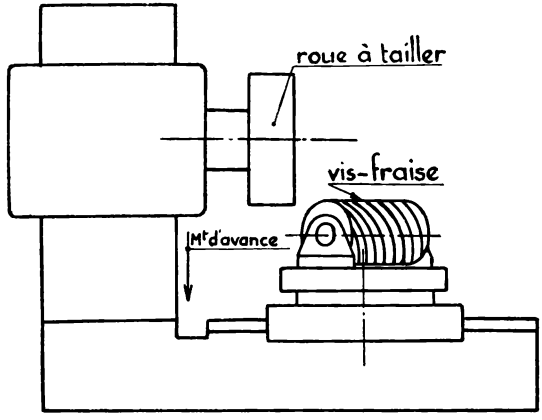


Fig. 47. — Machine à tailler par vis-fraise : schéma.

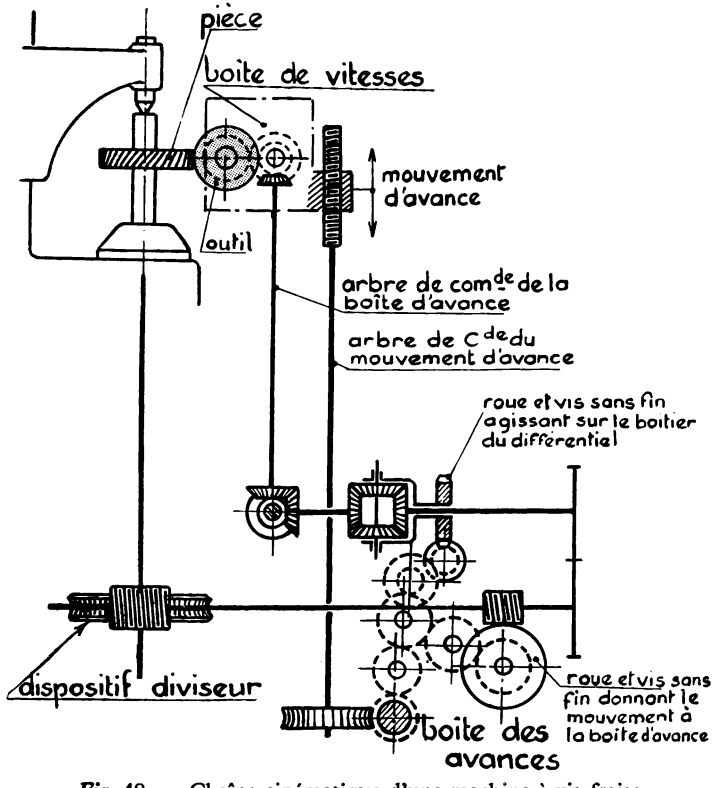


Fig. **48.** — Chaîne cinématique d'une machine à vis-fraise.

Productivité.

Le temps de taillage est donné par la formule :

$$T = \frac{z\,(l + L)}{aNn}$$

z : nombre de dents à tailler,
l : longueur d'entrée de la fraise (*fig.* 49) en mm,
L : largeur de la roue (sur la denture), en mm,
a : avance par tour en mm,
N : nombre de tours de la fraise,
n : nombre de filets de la fraise.

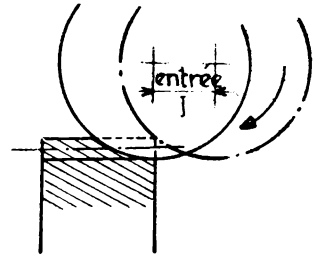


Fig. 49. — Temps de taillage par vis-fraise.

L'avance dépend du nombre de dents de la fraise et du fini cherché ; a est compris entre 0,5 et 1 mm. En ébauche, on peut accepter de la rugosité si on finit par le fraisage. Si on rectifie à la meule, on soigne davantage l'ébauche. On peut ébaucher avec une vis-fraise spéciale ayant des dents moins larges : on taille à fond de dent et la fraise de finition ne travaille que sur les flancs de filets.

La vitesse de coupe admise pour les fraises en acier à coupe rapide supérieur est plus élevée que celle des outils-crémaillères qui travaillent au choc.
On admet :

Fonte	16 à 25 m/mn,
Aciers $(R_r)_e < 60$ kg/mm².....	25 à 32 m/mn,
Aciers $(R_r)_e > 60$ kg/mm².....	16 à 25 m/mn,
Bronzes et matières plastiques.....	25 à 50 m/mn.

La taille par vis-fraise est un procédé rapide (il faut par exemple 13 s pour tailler *une dent* sur une roue en acier au nickel-chrome, module 4). Il permet d'obtenir en deux passes un travail soigné. Mais ce procédé n'est pas applicable aux roues intérieures.

RÉALISATION DU TAILLAGE DES VIS SANS FIN

Les vis sans fin conduisant des roues hélicoïdales et des roues tangentes sont souvent usinées au tour ; mais ce travail est long et n'est acceptable que pour les petites séries. Pour de grandes quantités, on recourt à d'autres techniques.

Taillage à l'outil de forme.

Taillage à la fraise.

On emploie une fraise au module, à flancs de crémaillère, animée de la vitesse de coupe, et dont le support se déplace parallèlement à l'axe de la vis à tailler (*fig.* 50). Ce

déplacement s'effectue à raison d'un pas par tour de la pièce. La vitesse de rotation de la pièce (vis à produire) correspond à une avance de fraisage. La vis peut souvent être taillée en un seul passage de la fraise (machine Pratt et Whitney).

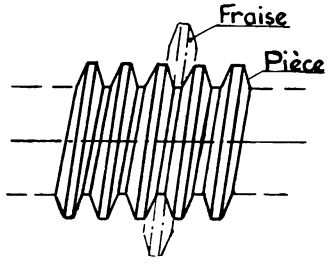


Fig. 50. — Usinage d'une vis sans fin par fraise-module.

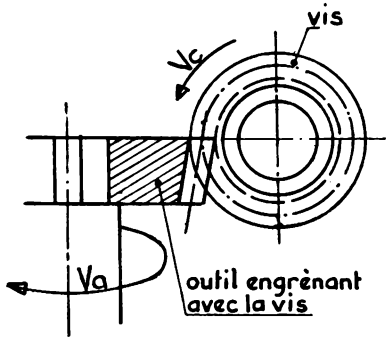


Fig. 51. — Usinage d'une vis sans fin par outil-pignon.

Taillage par engrènement.

a) *Taillage à l'outil-pignon.*

Si une vis-fraise taille un pignon, réciproquement, le pignon, s'il est taillé en outil, taillera la vis (*fig.* 51).

La vis est animée de la vitesse de coupe V_c et l'outil-pignon reçoit un mouvement de rotation conjugué de vitesse V_a liée à V_c par la relation :

$$\frac{V_a}{V_c} = \frac{\text{nombre de filets}}{\text{nombre de dents}}$$

On donne également, au chariot porte-outil un déplacement parallèle à l'axe de la vis, pour tailler celle-ci sur toute sa partie utile.

b) *Taillage à l'outil-crémaillère.*

La vis, considérée comme un cas particulier des engrenages hélicoïdaux, peut être taillée sur la machine Sunderland, puisque le chariot porte-outil peut être incliné de 0 à 90°.

TAILLAGE DES ROUES TANGENTES

La roue tangente est en contact avec la vis sur la longueur de l'arc $\overset{\frown}{AB}$ (*fig.* 52). La roue porte le nom de roue « creuse », ou roue tangente. Il est bien évident que l'outil de taille ne peut se déplacer parallèlement à l'axe de la roue pour réaliser le « creux » des dents. L'usinage de ces roues peut être obtenu de différentes façons :

a) *Taillage à l'outil-fraise.*

La première idée qui se présente à l'esprit est de recourir à la pénétration radiale d'une vis-fraise suivant la direction F (*fig.* 52*a*). Il faut évidemment que, pendant cette pénétration, la roue (pièce) soit animée d'un mouvement de rotation avec rapport des vitesses :

$$\frac{V_v}{V_r} = \frac{\text{nombre de dents de la roue}}{\text{nombre de filets de la vis}}$$

Les machines utilisées sont celles que l'on emploie pour la taille des engrenages

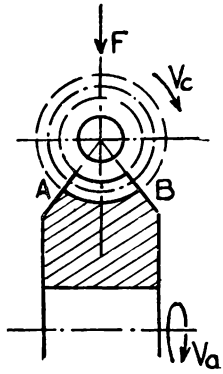


Fig. 52*a*. — Taillage d'une roue tangente par vis-fraise cylindrique.

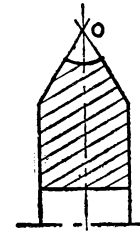


Fig. 52*b*. — Ébauche de la pièce.

cylindriques. On enfonce progressivement la fraise ; quand la cote de profondeur est atteinte, la pièce doit encore faire un tour complet pour être achevée. La fraise doit évidemment avoir les dimensions de la vis sans fin qui entraînera la roue tangente.

b) *Taillage par vis-fraise conique* (fig. 53 *a*-53 *b*).

Cet outil fonctionne à la manière d'un taraud et agit tangentiellement à la roue à produire.

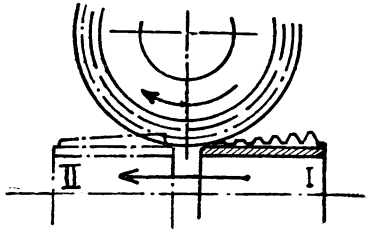


Fig. 53*a*. — Taillage d'une roue tangente par vis-fraise conique.

La rotation de la roue et de l'outil et le déplacement axial sont conjugués.

On emploie la machine à tailler par vis-fraise, munie d'un dispositif spécial qui donne le déplacement de l'outil de I vers II.

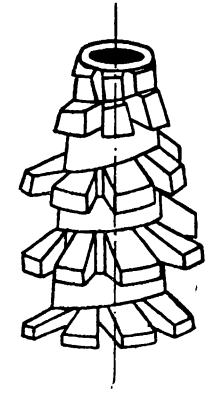


Fig. 53*b*. — Vis-fraise conique.

c) *Taillage par outil-mouche* (fig. 54).

La fabrication d'une vis-fraise cylindrique ou conique pour tailler une seule roue tangente serait trop coûteux, bien plus que la pièce elle-même.

Dans ce cas, on emploie un outil simple, à un seul tranchant convenablement affûté, monté sur une barre d'entraînement : c'est l'outil-mouche.

Pour l'employer, il faut une machine à tailler les engrenages cylindriques, sur laquelle un dispositif spécial entraîne la barre tangentiellement à la pièce à tailler. C'est le même

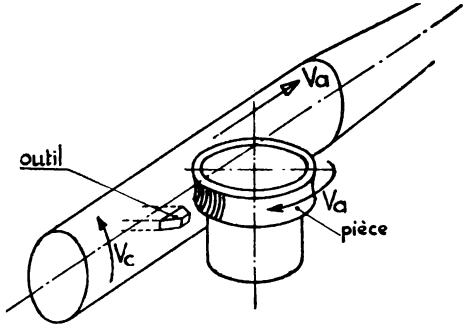


Fig. 54. — Taillage d'une roue tangente par outil-mouche.

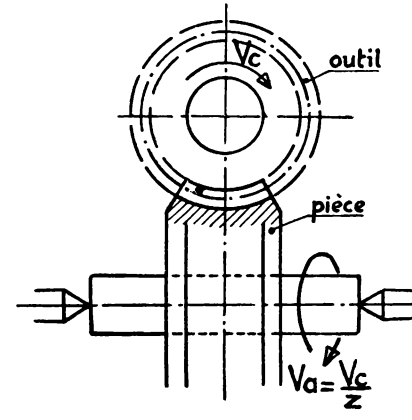


Fig. 55. — Montage pour tailler une roue tangente.

procédé que ci-dessus, mais, comme on n'a qu'un seul taillant, l'avance est obligatoirement très lente, et la productivité est faible.

d) *Taillage sur la fraiseuse.*

1° On commence par ébaucher toutes les dents de la roue par pénétration *radiale* d'une *fraise-module* inclinée suivant la tangente à l'hélice de la roue tangente. On effectue la division dent par dent. On emploie la machine à fraiser horizontale.

2° On remplace ensuite la fraise par une vis-fraise de mêmes caractéristiques que la vis de commande de la roue à tailler.

La pièce est montée sur un mandrin et prise entre les pointes d'un diviseur sur lesquelles elle tourne folle. On descend la fraise au contact de la pièce, *machine arrêtée*, puis on met en route : l'outil entraîne la roue et on descend la fraise à fond de dent progressivement (*fig.* 55).

RÉALISATION DU TAILLAGE DES ENGRENAGES CONIQUES

La denture de ces engrenages peut être droite ou courbe, hélicoïdale ou en spirale. Le taillage peut être obtenu :

— par reproduction : un outil d'enveloppe taille le flanc des dents ;
— par engrènement : le flanc des dents est la surface enveloppe des positions successives de l'outil.

Le taillage par reproduction n'est pratiquement utilisé que pour les dentures droites.

Éléments caractéristiques d'une roue conique *(fig. 56).*

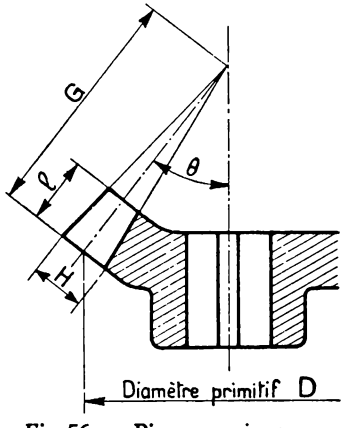


Fig. 56. — Pignon conique.

Pour qu'une roue conique puisse être taillée sur les machines spéciales existantes, il faut lui donner des proportions bien définies :

$$\frac{1}{3} G > l > \frac{1}{4} G \ (1)$$

z : nombre de dents

p : pas circonférentiel : $p = \frac{\pi D_p}{z}$

M : module $\frac{D_p}{z} = \frac{p}{\pi}$

$l = 4$ à 8 M mais à condition que l'inégalité (1) soit satisfaite.

Le module M qui définit la roue est le plus gros, celui qui est pris à l'extérieur.

I. - TAILLAGE DES DENTURES DROITES

Taillage par reproduction.

a) *Principe.*

Toutes les dents limitées par deux développantes ayant même angle de pression, sont des figures homothétiques d'un même profil ou gabarit G (*fig.* 57) par rapport au centre d'homothétie ω.

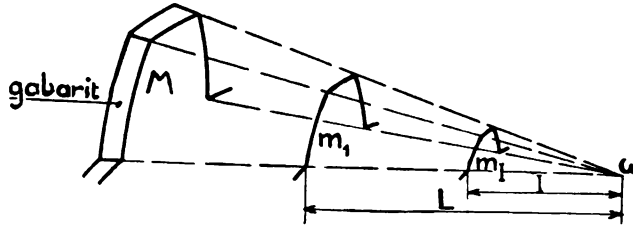


Fig. 57. — Taillage d'un pignon conique par reproduction.

b) ***Réalisation.***

On peut donc imaginer un étau-limeur (*fig.* 58) dont l'outil tracerait les génératrices successives de la face et du flanc de la dent. Sur le schéma ci-contre, la glissière est

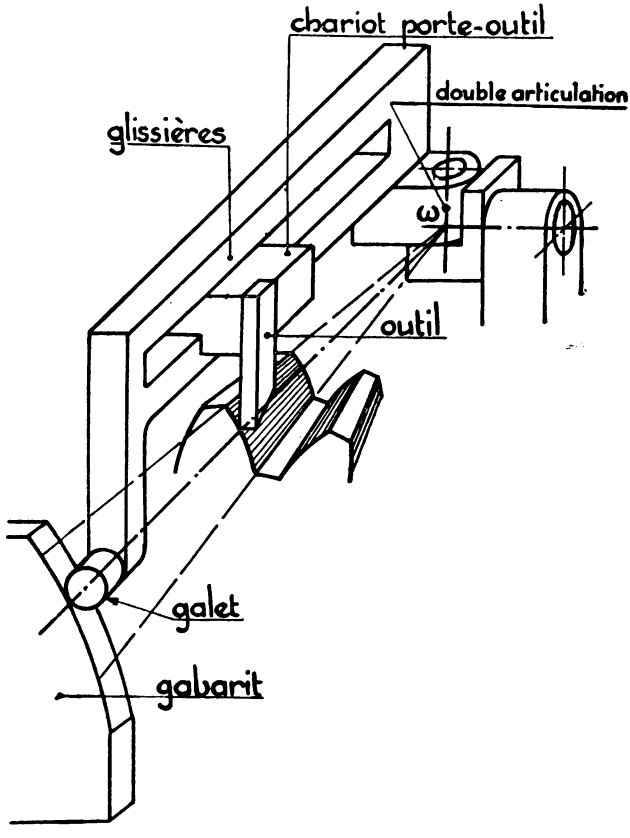


Fig. 58. — Principe d'une machine à tailler conique.

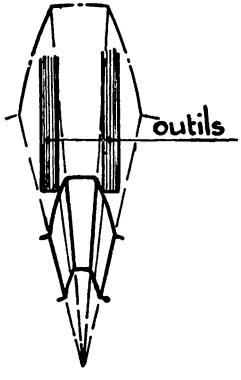


Fig. 59. — Taille conique avec deux outils.

astreinte, en restant dans le plan vertical, à tourner autour du point ω (sur une double articulation), le galet *g* étant maintenu constamment en contact avec le gabarit.

Pour accroître la production horaire de la machine, on peut faire agir simultanément deux outils et usiner en même temps les deux flancs d'une même dent (*fig.* 59).

Pour conjuguer les 2 outils, on peut utiliser le dispositif (*fig.* 60), extrêmement simple (machine Zimmermann) et que nous citons car il peut être appliqué dans d'autres cas.

On ébauche la denture avec une fraise au module, dent par dent, sur la machine à fraiser équipée d'un diviseur universel.

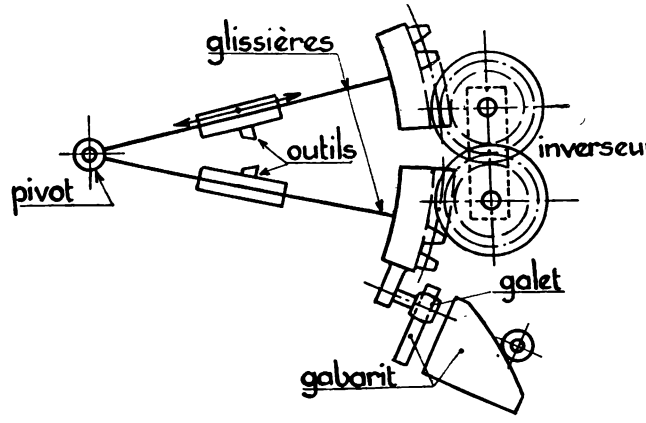


Fig. 60. — Principe de la machine Zimmermann.

c) *Productivité.*

Ce procédé d'usinage est lent, car il nécessite en fait deux opérations : l'ébauche à la fraise, puis la finition. Il ne peut convenir que pour de très petites séries de pièces. Il est de plus en plus remplacé par le taillage par engrènement.

Taillage par engrènement.

Réalisation.

Considérons l'engrenage ci-contre (*fig.* 61) : roue A et pignon B ; l'angle au sommet du cône primitif de la roue est 180° : c'est une *roue plate.*

On montre, en cinématique, que le profil des dents de la roue plate est rectiligne dans le cas où l'on utilise la développante de cercle. Il s'agit d'une véritable crémaillère fictive : la *crémaillère conique.* Chaque dent a donc la forme d'un tronc de pyramide de sommet O.

Pour tailler les dents de la roue B, on a matérialisé cette crémaillère conique par *deux outils à flancs droits* dont les arêtes tranchantes sont inclinées, sur la verticale, de l'angle de pression β (*fig.* 62).

Par analogie avec la machine à couteau crémaillère Sunderland, on conçoit qu'il faille produire la rotation $f1$ du pignon, conjuguée avec le déplacement latéral des deux outils (*fig.* 62 *a* à *c*). Après un déplacement correspondant à l'usinage d'une dent, les outils doivent se dégager, revenir en position de départ et passer à la dent suivante (*fig.* 63 *d*).

Ces croquis montrent comment s'effectue le mouvement relatif pièce-outils.

Pour éviter que les deux couteaux (dont les trajectoires se rencontrent en O) se heurtent, l'un avance tandis que l'autre recule. Pendant leur retour, ils se soulèvent pour ne pas frotter sur la pièce.

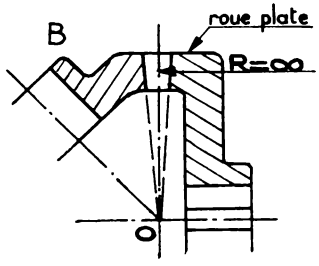


Fig. 61. — Couple conique à roue plate.

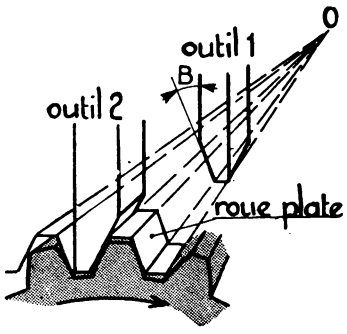
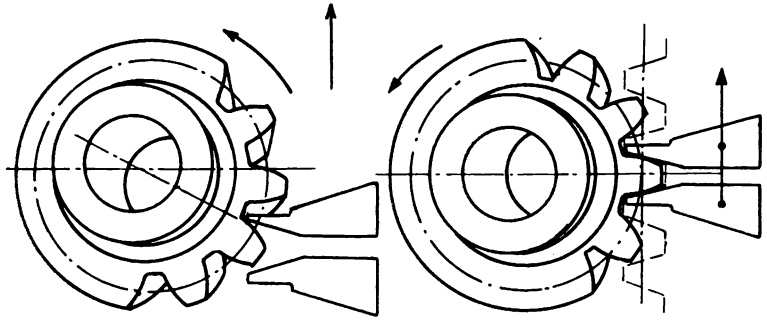
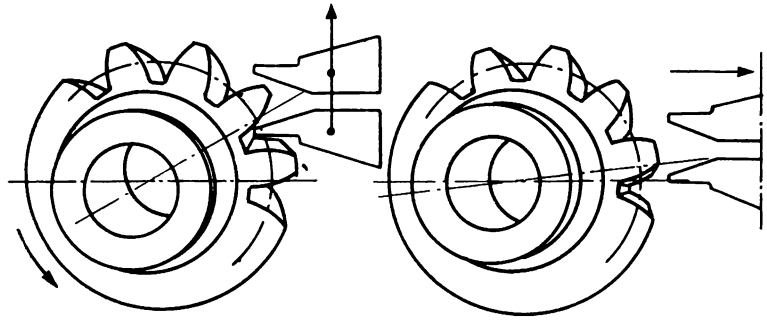


Fig. 62. — Matérialisation d'une roue plate.



a) Début de travail.

b) Position moyenne des outils.



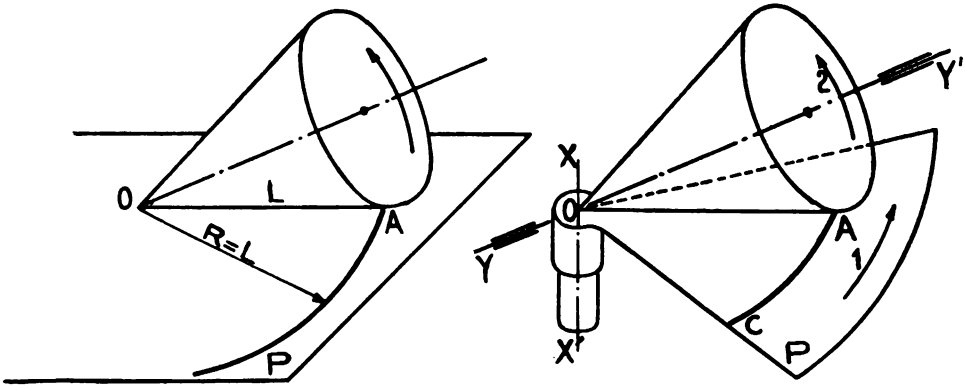
c) Outils en fin d'usinage d'une dent.

d) Outils dégagés pour permettre la division.

Fig. 63. — Génération d'un pignon conique sur GLEASON.

TAILLAGE PAR ENGRÈNEMENT

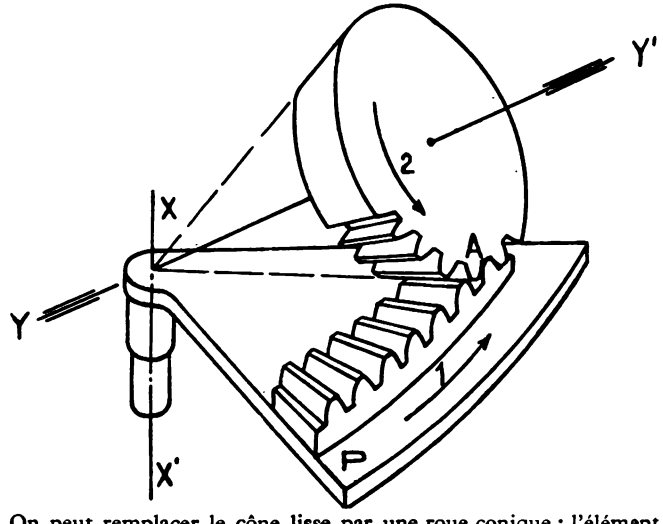
Réalisation des mouvements conjugués pièce-outil.



Principe : roulement d'un cône sur un plan. L'extrémité A d'une génératrice décrit une circonférence quand le sommet O du cône reste fixe pendant le roulement.

Le plan P est tangent au cône et est entraîné en rotation autour de XX' qui lui est perpendiculaire. Le cône est entraîné suivant 2 en rotation sans glissement autour de YY'. Les deux mouvements sont dits conjugués.

Fig. 64. — Principe de la production des mouvements conjugués.



On peut remplacer le cône lisse par une roue conique ; l'élément avec lequel elle engrène alors dans le plan P est appelé roue plate ou crémaillère conique. La rotation 1 engendre la rotation 2.

Fig. 65. — Réalisation des mouvements conjugués : crémaillère conique et pignon conique.

Machine.

La machine GLEASON est fondée sur le principe qui vient d'être exposé. Les mouvements conjugués, déplacement des outils et rotation de la pièce, sont obtenus par le roulement d'un secteur de roue conique, solidaire de l'axe de la pièce, sur une

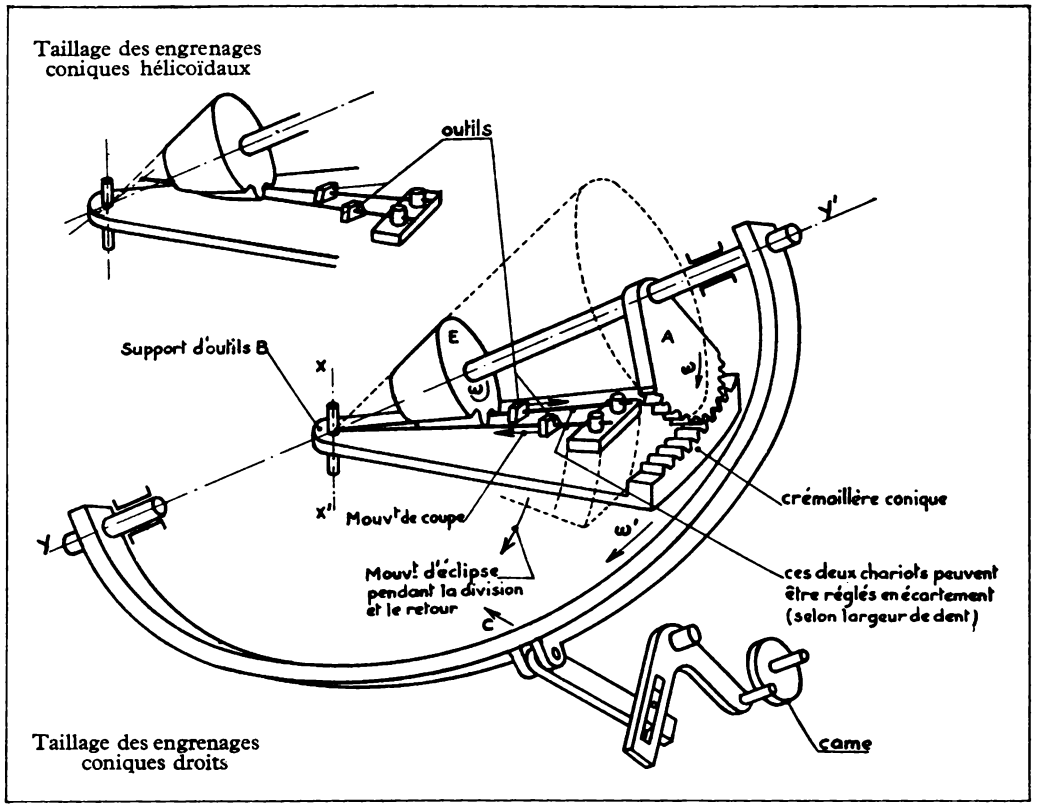


Fig. 66. — Principe de la machine Gleason pour taille des engrenages coniques droits et hélicoïdaux à outils couteaux.

crémaillère conique. L'angle au sommet du secteur conique doit être égal à celui de la roue à tailler (*fig.* 64, 65, 66).

La came (*fig.* 66) donne le mouvement à l'arcade, qui entraîne dans sa rotation l'arbre support de pièce et le secteur denté, à la vitesse angulaire ω. La crémaillère conique et le plateau support porte-outils sont entraînés, et tournent autour de xx' à la vitesse angulaire ω' qui est la vitesse conjuguée de ω.
Les outils ont le même mouvement que celui d'un étau-limeur.

Pour tailler les engrenages coniques hélicoïdaux les trajectoires des outils ne se coupent pas sur l'axe xx'.

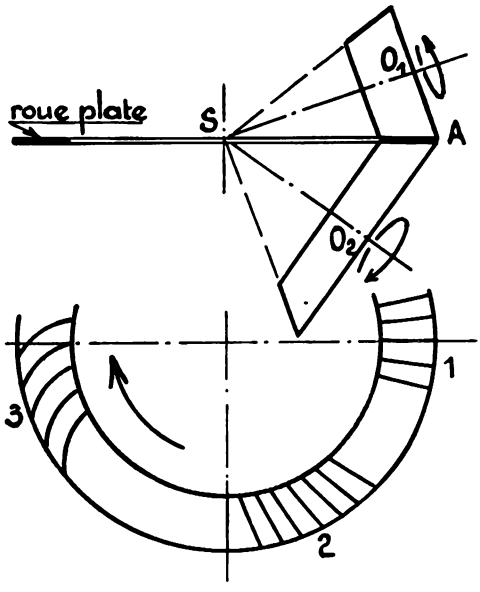


Fig. 67. — Roue plate et types de denture.

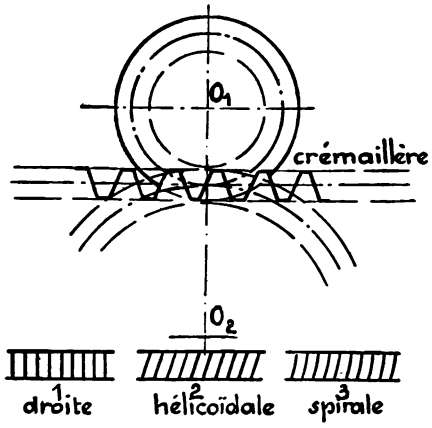


Fig. 68. — Dentures : droite, hélicoïdale et spirale.

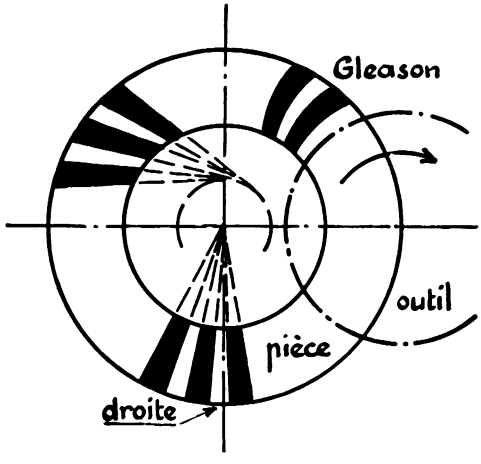


Fig. 69. — Outil de la machine Gleason Spiral.

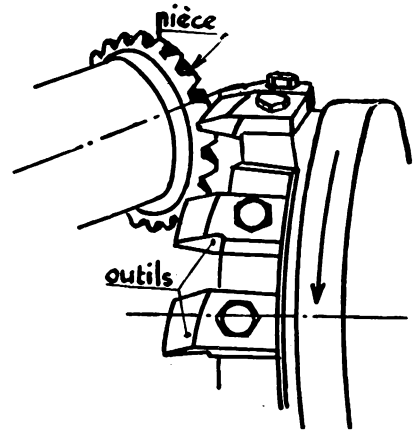


Fig. 70. — Tête de la Gleason Spiral.

Productivité.

Temps de taillage pour une dent obtenue en une passe ; longueur de la dent = 6 modules.

Module	Temps	Module	Temps
1,25	0,54 ch	3	2 ch
1,50	0,70	3,25	2,17
1,75	0,82	3,50	2,33
2	0,94	4	2,67
2,25	1,50	4,50	4,50
2,50	1,67	5	5
2,75	1,83	1 ch = 1/100 d'heure	

III. — TAILLAGE DES DENTURES COURBES

Principe.

Tous les pignons qui engrènent avec une même roue plate engrènent normalement entre eux. Donc, si un ou plusieurs outils matérialisent la roue plate de module m, (pris à l'extérieur), tous les pignons de même module pourront être obtenus.

On peut aussi considérer une roue plate comme la couronne d'épaisseur nulle qui serait « laminée » entre deux pignons O_1 et O_2 engrenant ensemble et ayant pour sommet commun S (*fig.* 67). Si nous supposons S rejeté à l'infini, la roue plate devient réellement une crémaillère d'épaisseur nulle engrenant avec deux roues cylindriques. On conçoit que la crémaillère pourrait avoir des dents de différentes formes : droites, obliques, courbes (*fig.* 68). Il en est ainsi de la roue plate génératrice et, par suite, des roues coniques taillées : denture droite (*fig.* 67-1), hélicoïdale (*fig.* 67-2) ou spirale (*fig.* 67-3).

Taillage spirale.

Elle a été réalisée par Gleason. L'action continue des outils, animés d'un mouvement *circulaire*, rend l'opération beaucoup plus rapide (*fig.* 69).

L'outil est une fraise à dents multiples (*fig.* 70), délicat à régler, mais très productif. La machine Gleason Spiral est également plus simple, cinématiquement, que la Gleason pour dents droites.

La *figure* 71 représente le schéma de cette machine. L'outil-fraise est porté par deux chariots montés sur un berceau. La rotation ω_2 communiquée au berceau, est conjuguée à la rotation ω_1 reçue par le pignon à tailler, et correspond à celle de la crémaillère fictive conique qui engrènerait avec le pignon.

On imagine aisément qu'une meule de forme puisse être substituée à la fraise. C'est le procédé de rectification des dentures spirales.

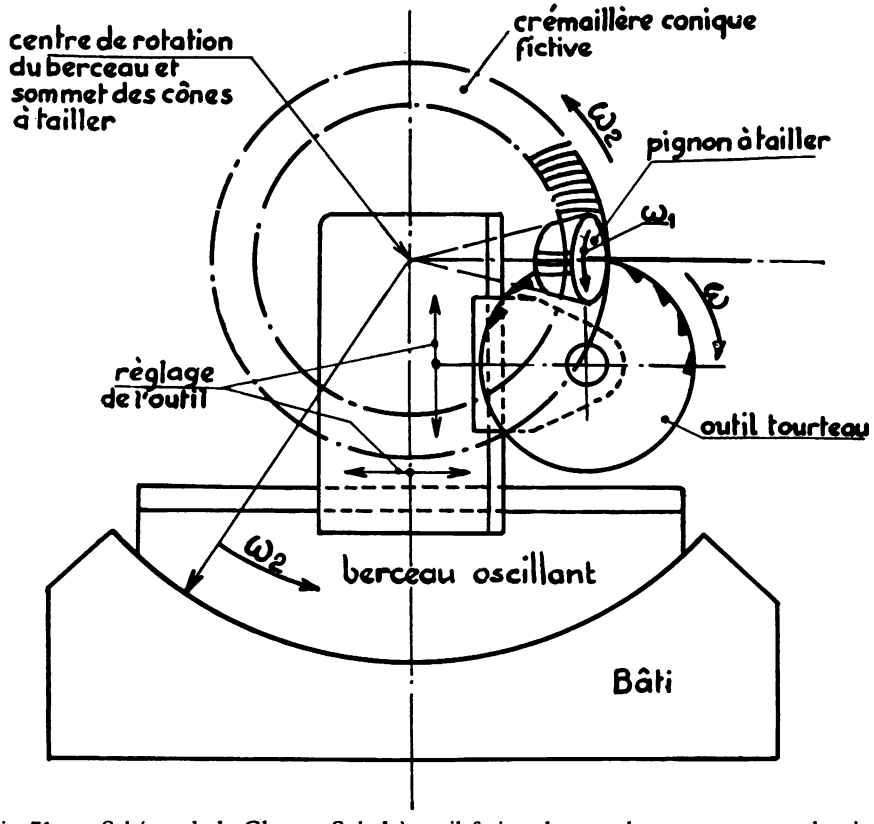


Fig. 71. — Schéma de la Gleason Spiral à outil fraise plateau : le mouvement w_1 du pignon est conjugué avec le mouvement w_2 du berceau.

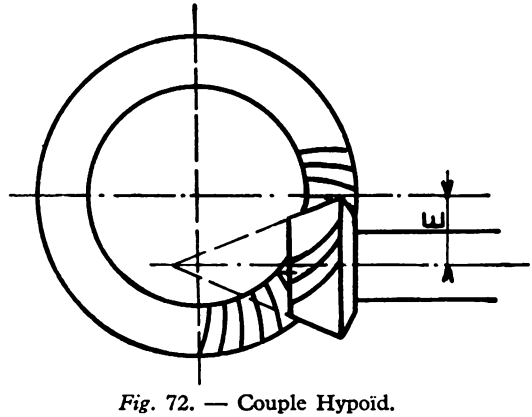


Fig. 72. — Couple Hypoïd.

Taillage Hypoïd.

Un type d'engrenages coniques dont les axes ne sont pas concourants (*fig.* 72) est le couple hypoïd très répandu dans la construction automobile ; leur taillage est analogue au taillage spiral. Leur tracé est compliqué et presque toujours confié à des spécialistes qui établissent en outre les outils et fixent les réglages de la machine. Les machines Hypoïd les plus connues sont Gleason et Klingelnberg.

Taille des dentures par brochage.

Principe.

La taille des dentures cylindriques n'est qu'un cas particulier du brochage extérieur. On l'effectue généralement sur des machines à brocher verticales ; la pièce est montée sur un plateau diviseur.

Mais le procédé le plus employé est le procédé REVACYCLE qui n'est autre qu'un brochage circulaire. Il est surtout employé dans l'industrie automobile pour tailler les pignons satellites des différentiels. La forme des dents est assez particulière mais néanmoins le fonctionnement du différentiel n'en est nullement affecté et l'opération de taillage est extrêmement rapide. La *figure* 73 donne le schéma de principe de la machine.

Pendant que l'outil fait un tour, l'axe du tourteau se déplace :

- de O_1 en O'_1 : ébauche, déplacement lent ;
- de O'_1 en O_2 : 1/2 finition, déplacement plus rapide ;
- de O_2 en O'_1 : finition (coupe en avalant).

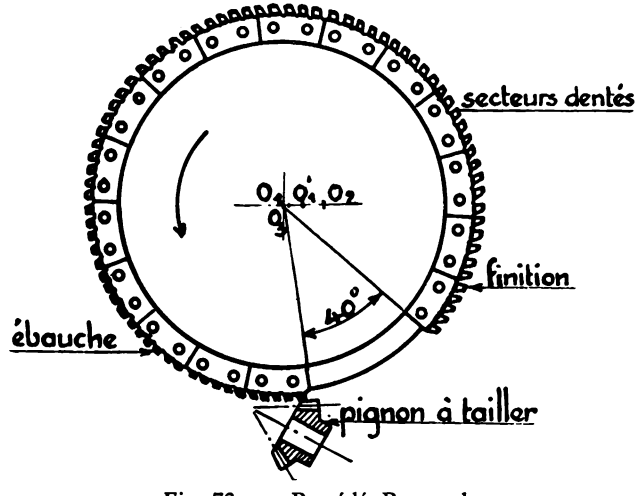


Fig. 73. — Procédé Revacycle.

Le passage d'une dent à la suivante a lieu pendant que la pièce se trouve dans la partie de la broche qui ne possède pas de dents. A chaque tour de l'outil, une dent est entièrement taillée.

Le réglage se fait en déplaçant O_1 suivant O_1O_2.

Productivité.

Elle est très importante ; en voici un exemple :

pignon conique de 10 dents, module 5 : chaque dent est taillée en 2,5 à 3,5 s. Les 10 dents sont achevées en 25 à 35 s. On arrive à produire 120 pignons à l'heure. Cette machine est également construite par la Société Gleason.

FINITION DES ROUES ET PIGNONS

Pour que les engrenages fonctionnent silencieusement et sans vibration, on prévoit, pour les constructions soignées, une opération de finition destinée à améliorer l'état de surface de la denture et la précision des profils.

Cette finition peut être obtenue :

— par abrasion : rectification et rodage,

— par grattage : rasage (shaving).

1. — RECTIFICATION

La rectification peut être faite :

— avec outil de forme : meule profilée,

— avec outil d'enveloppe : face plane d'une meule.

La rectification s'applique surtout à des dentures trempées.

Principe de la rectification.

1° *Outil de forme.*

On peut rectifier simultanément les deux profils d'un creux (*fig.* 74). La meule-disque est formée à l'aide de deux diamants conduits par un pantographe, elle est profilée et réglée automatiquement après un nombre de passes déterminé. Il est intéressant de remarquer que les conditions de travail de la meule ne sont pas les mêmes tout le long du profil. En particulier la vitesse de coupe au sommet des dents ($V_1 = \omega r$) est plus faible qu'à la base ($V_2 = \omega R$) ; la meule s'use donc inégalement pendant le travail, et la différence, modifiant le profil, est d'autant plus sensible que la différence relative des vitesses $\frac{V_2 - V_1}{V_2}$ est plus importante.

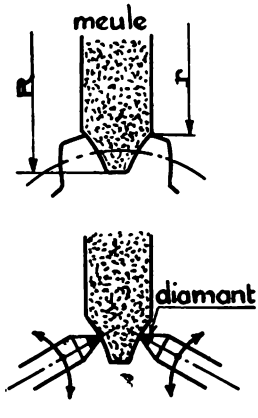


Fig. 74. — Rectification par meule de forme.

Pour éviter cet inconvénient, on choisit des meules de grand diamètre (jusqu'à 800 mm) : alors

$$\frac{V_2 - V_1}{V_2} = \frac{\omega R - \omega r}{\omega R} = \frac{R - r}{R} = \frac{2{,}15\,M}{R}$$

devient petit, puisque R est choisi grand par rapport au module M de l'engrenage.

Les machines NILES et MINERVA sont conçues sur ce principe.

Pour éviter l'inconvénient signalé ci-dessus, certaines machines à rectifier prévoient la rectification d'un seul flanc de dent par la meule.

Les rayons extérieurs de la partie profilée, r et R, sont très peu différents. Il y a peu d'abrasif à enlever pour profiler la meule ; on en consomme moins à chaque réaffûtage (*fig.* 75).

Avec cette machine ne travaillant que sur un flanc à la fois, il est nécessaire de retourner la pièce pour rectifier la deuxième face : il faut que le mandrin porte-pièce soit parfaitement exécuté. C'est sur ce principe qu'a été réalisée la machine française S.F.E.D.R.

Les deux procédés que nous venons d'examiner permettent de rectifier des roues hélicoïdales.

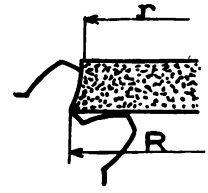


Fig. 75. — Procédé S.F.E.D.R.

2° *Outil d'enveloppe.*

La roue à rectifier roule sur un élément de crémaillère (une dent) ; cet élément est constitué, suivant les machines :

— par une meule dont le profil est celui d'une demi-dent de crémaillère (*fig.* 76). Procédé WALCOTT : avec meule de 760 mm. Procédé FELLOWS : avec meule-assiette dressée automatiquement après chaque dent ;

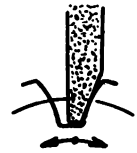


Fig. 76. — Procédé Walcott.

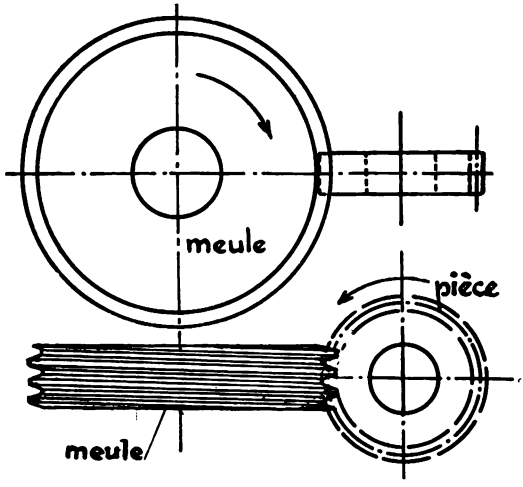


Fig. 78. — Procédé Reishauer.

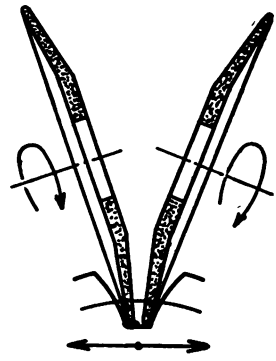


Fig. 77. — Procédé Maag.

— par deux meules-assiettes jumelées et inclinées (*fig.* 77) ; l'angle qu'elles forment est égal au double de l'angle de pression de la roue à rectifier. Sur ce principe ont été construites la machine MAAG et la ZIMMERMANN ;

— par une meule en forme de vis sans fin (*fig.* 78) : procédé REISHAUER ;

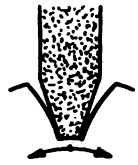


Fig. 79. — Procédé Deutsch-Niles.

— par une meule dont le profil est un trapèze isocèle sur lequel le pignon roule : procédés DEUTSCH-NILES-HERMANN (*fig.* 79).

2. — RODAGE

Généralement, la rectification et le rasage ne peuvent être appliqués à la finition des engrenages coniques. Ceux-ci sont taillés avec le maximum de précision et on améliore l'état de surface des dents par un rodage réciproque du pignon sur la roue. Le pignon, par exemple, entraîne la roue, et l'on projette sur la denture un mélange d'huile et de pétrole portant en suspension de l'abrasif. On « écoute » l'engrenage pendant l'opération, et, quand on juge qu'il est devenu suffisamment silencieux, on arrête l'opération et l'on repère (sur un vernier) la position relative de deux pièces. Au montage, des calibres permettent de replacer les roues dans la position du rodage. L'écoute du bruit des engrenages se fait avec des appareils à amplification électronique qui permettent aussi de mesurer les vibrations. Ce procédé est employé pour finir puis monter les ponts arrière des voitures automobiles.

3. — RASAGE

Le rasage est une opération de finition faite après taillage, mais avant traitement thermique.

L'outil n'est plus une meule, et il produit des copeaux grattés, râclés, donc très minces ; il ressemble à une roue dentée dont les dents seraient coupantes. Le procédé est né aux U.S.A. sous le nom de « shaving » (mot anglais signifiant : rasage). Il s'applique aux roues droites et aux roues hélicoïdales.

Principe.

L'outil a l'aspect d'une roue cylindrique à denture droite ou hélicoïdale, sur les dents de laquelle on a taillé des rainures, parallèlement au profil et sur toute sa hauteur (*fig.* 80). La denture de l'outil pour raser les roues droites est hélicoïdale, et, inversement, elle est droite pour les roues hélicoïdales. L'outil et la roue à finir doivent constituer un engrenage hélicoïdal, c'est-à-dire que leurs axes ne doivent pas être parallèles. L'angle d'inclinaison est de 15° à 20° (*fig.* 81).

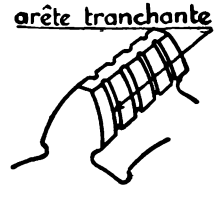


Fig. 80. — Une dent d'un couteau de shaving.

Pour comprendre le mode d'action de l'outil, reprenons le matériel qui nous a servi pour étudier les propriétés des profils conjugués. Sur un des disques, montons un flanc de dent en carton cintré et collé : c'est la pièce à usiner.

Le profil de la dent de l'autre disque O_2 représente l'arête tranchante.

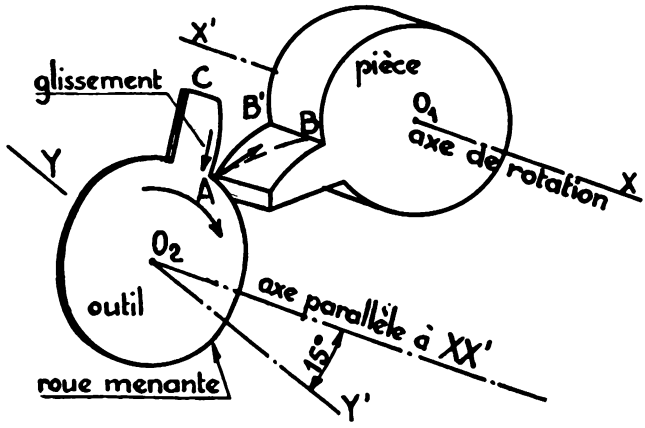


Fig. 81. — Etude cinématique du shaving.

Lorsqu'on fait tourner le disque O_2 (outil), il entraîne la pièce, et le lieu des points de contact de l'arête AC (supposée tranchante) avec le flanc de la dent taillée sur la pièce, est la courbe AB, oblique par rapport au profil AB'.

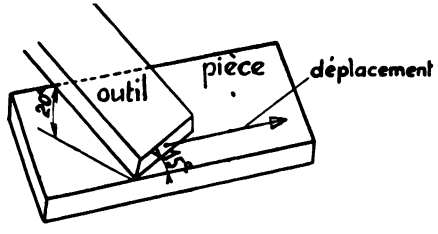


Fig. 82. — Principe du shaving.

Mais nous avons vu que, pendant l'entraînement, il y a glissement des deux profils conjugués ; AC joue par rapport au flanc de la dent le même rôle qu'un grattoir qui se déplacerait obliquement par rapport à la pièce taillée (voir *fig.* 82) : il y a production d'un copeau très mince.

Réalisation.

L'outil de rasage est animé d'une vitesse angulaire et entraîne en rotation la roue rasée par simple contact sur les dents.

Puisque la pièce et l'outil sont l'une à denture droite et l'autre à denture hélicoïdale, l'une des surfaces de contact est à génératrices rectilignes (dents de la pièce ou de l'outil), et l'autre à génératrices curvilignes (dents de l'outil ou de la pièce) ; le contact de l'outil et de la pièce se produit seulement dans une zone située au milieu de la dent (*fig.* 83).

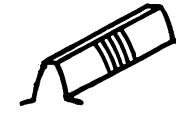


Fig. 83. — Shaving localisé.

Il faut donc, pour raser toute la denture, provoquer un déplacement relatif de l'outil et de la pièce. Ce déplacement est une translation de l'outil ou de la pièce. Il peut être :

— *longitudinal* (*fig.* 84) : le déplacement D de la pièce ou de l'outil est parallèle à l'axe de la pièce. Le point médian de la zone de rasage R est à l'intersection des deux axes. Pour faire varier la position de ce point, on déplace l'outil suivant son axe : on évite ainsi de localiser l'action au même endroit.

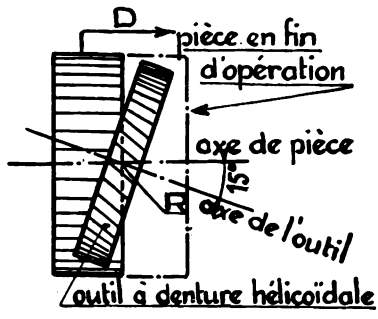


Fig. 84. — Shaving longitudinal.

— *oblique* (*fig.* 85) : le déplacement de la pièce par rapport à l'outil se fait suivant la droite R_2A. On établit facilement que :

$R_2a = l_2 \sin \alpha$ (triangle R_2aR_1) et que :

$Aa = l_1 - l_2 \cos \alpha$,

car $R_1a = l_2 \cos \alpha$;

d'où $\operatorname{tg} \gamma = \dfrac{R_2a}{Aa} = \dfrac{l_2 \sin \alpha}{l_1 - l_2 \cos \alpha}$

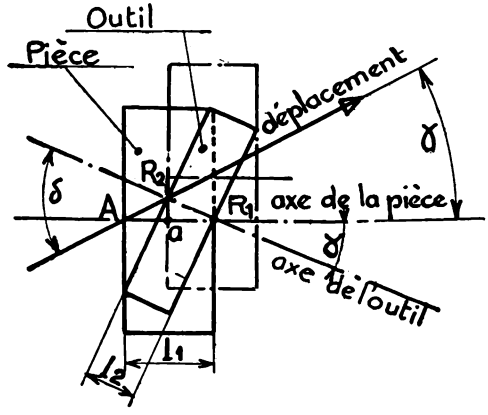


Fig. 85. — Shaving oblique (R_1 est un point d'épure).

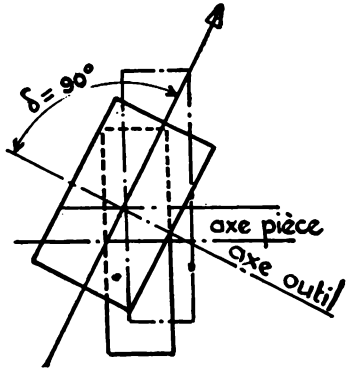


Fig. 86. — Shaving transversal.

— *transversal* (*fig.* 86) : C'est un cas particulier de la méthode précédente. La pièce se déplace suivant une direction perpendiculaire à l'axe de l'outil : $\delta = 90°$. Ceci suppose une largeur d'outil au moins égale à la largeur de la pièce.

Dans tous les cas, c'est l'outil qui commande la pièce montée entre pointes. L'outil tourne d'abord dans un sens, puis dans le sens contraire pendant le retour. Il effectue ainsi plusieurs passages, en prenant à chaque fois une profondeur de passe égale à quelques centièmes de millimètre. La vitesse de coupe est de 100 à 200 m/mn ; la vitesse de déplacement de 10 à 12 mm/mn.

Il faut arroser très abondamment avec une huile de coupe spéciale.

Possibilités complémentaires de ce procédé.

Ce procédé permet d'obtenir facilement les dents « bateau », amincies sur les bouts (*fig.* 87). L'avantage de cette technique est que les arbres qui reçoivent les

Fig. 87. — Dent forme bateau.

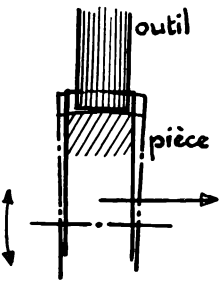


Fig. 88. — Production du shaving bateau.

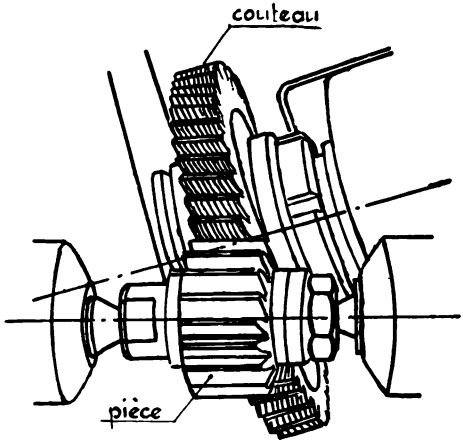


Fig. 89. — Shaving d'un pignon.

engrenages peuvent ne pas être rigoureusement parallèles, sans que le portage cesse d'avoir lieu dans la partie centrale de la dent. On obtient ce résultat en donnant un léger mouvement de bascule à la table porte-roue pendant son déplacement.

La *figure* 89 montre une opération de rasage.

Comparaison entre la rectification et le rasage.

L'opération de rasage est beaucoup plus rapide que la rectification, mais la pièce ne doit pas être traitée ; le traitement thermique est fait après le shaving Les pièces destinées à être usinées ainsi doivent être construites en acier *indéformable*. Comme pour la rectification, il faut laisser une surépaisseur sur les dents, et les outils de taille de « pré-shaving » doivent être établis en conséquence. On ne peut pas utiliser les mêmes outils pour tailler des roues qui resteront brutes ou rectifiées ou rasées. Tandis que l'outil-meule est un outil relativement bon marché, l'outil de rasage est très coûteux, car son établissement est long : plusieurs essais sont souvent nécessaires.

Un même couteau peut raser plusieurs milliers de pièces : son amortissement est donc facile. Le procédé se généralise dans les travaux de série moyenne renouvelable.

Filetage et taraudage

TRAVAUX DE FILETAGE

Le filetage au tour ne convient que pour des travaux unitaires ou en très petite série. L'opération est longue, parce que les passes sont nombreuses et la vitesse limitée, surtout si le filetage se termine contre un épaulement. En série, on emploie des machines à fileter spéciales de plus en plus souvent.

Classification des machines à fileter.

a) *Machines taillant les filets à l'outil :*
machines à fileter à la fraise ;
machines à fileter à l'outil unique (machine CRI-DAN) ;
machines à fileter par peignes.

b) *Machines où les filets sont produits par meulage :*
machines à meuler les filetages extérieurs ;
machines à meuler les filetages intérieurs.

c) *Machines produisant les filets par déformation :*
machines à molettes circulaires PEE-WEE ;
machines à outils rectilignes WATERBURY.

1. — MACHINES TAILLANT LE FILET A L'OUTIL

Machines à fileter à la fraise.

La fraise est inclinée suivant la tangente à l'hélice moyenne du filet, et tourne à la vitesse de coupe.

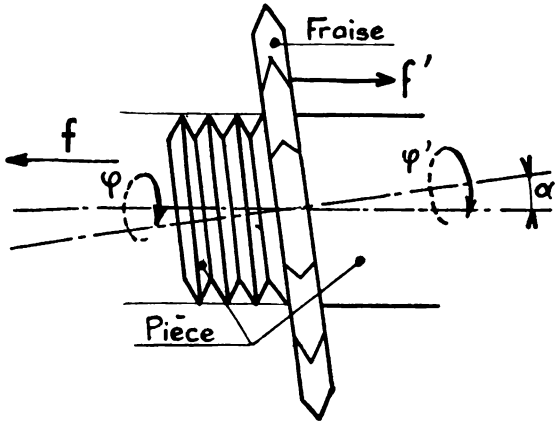


Fig. 1. — Exécution d'un filetage au moyen d'une fraise à un seul profil.

Il existe deux types de fraises pour fileter.

1° *Fraise à profil unique.*

La pièce reçoit un mouvement lent de rotation (avance) (*fig.* 1). Cette rotation est associée à un déplacement axial donné soit à la pièce elle-même suivant f, soit à l'outil suivant f'. Cette translation pour un tour de pièce est égale au pas à produire.

Le nombre total de tours que la pièce doit faire est donné par la relation $n = \frac{l}{p}$, où l est la longueur à fileter et p le pas.

Les machines construites sur ce principe sont utilisées pour effectuer des filetages longs, notamment les vis de commande des chariots de machines-outils.

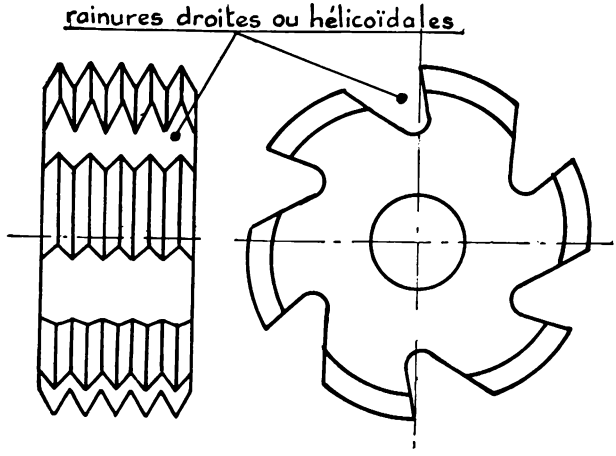


Fig. 2. — Fraise comportant plusieurs profils.

2° *La fraise comporte un nombre de profils égal à celui de la partie à fileter.*

La fraise n'est pas une vis ; elle comporte des sillons circulaires (*fig.* 2) coupés par des goujures droites, parallèles à son axe ou hélicoïdales. Ces goujures donnent la coupe et permettent l'évacuation des copeaux et le réaffûtage.

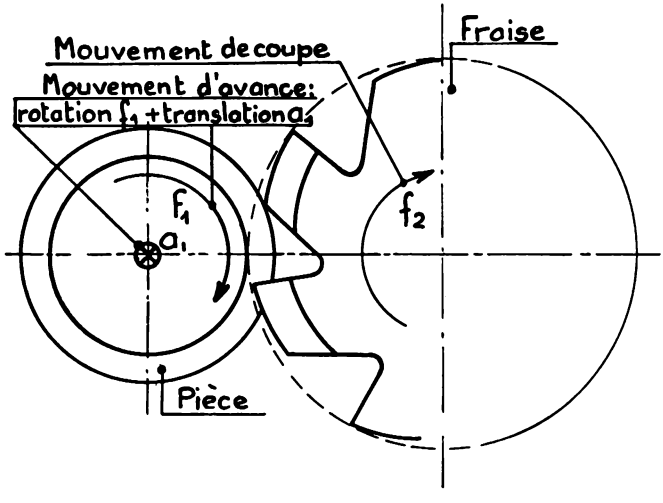


Fig. 3. — Mouvements de la pièce et de l'outil.

La vitesse de coupe est donnée à la fraise ; la pièce a le mouvement d'avance : mouvement hélicoïdal résultant d'une rotation lente et d'un déplacement axial égal à un pas par tour de pièce (*fig.* 3).

La *figure* 4 représente une machine à fileter à la fraise à profils multiples.

On fait d'abord tourner la fraise en laissant la pièce immobile, et on la fait pénétrer jusqu'à fond de filet ; on met alors la pièce en rotation. La broche de la machine tourne dans un écrou (patronne) dont le pas est égal au pas à produire ; la pièce, dont

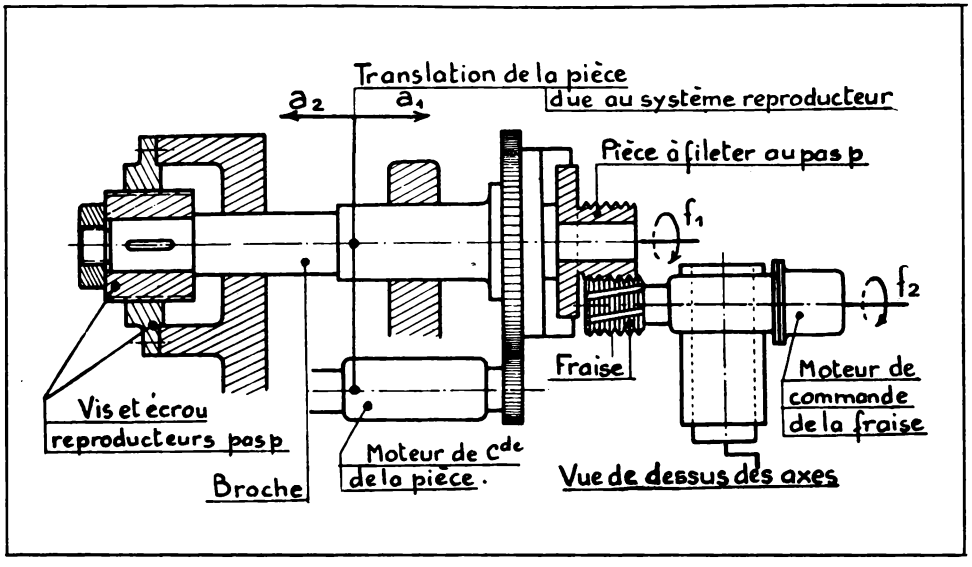


Fig. 4. — Machine à fileter à outil fraise Rouchaud.

elle est solidaire, se déplace donc axialement. En un tour de pièce, l'opération est terminée ; pratiquement, on fait un tour de plus pour assurer le raccordement correct des filets. La machine s'arrête automatiquement et l'outil se retire. Un dispositif manuel ou automatique ramène la broche en arrière en position de départ et le cycle peut recommencer.

Productivité.

Ce deuxième procédé est beaucoup plus rapide que le premier. Il convient bien pour les filetages courts usuels exécutés en série. L'avance par tour et par dent de la fraise est faible (environ 0,05 mm) car l'outil est fragile. La vitesse de coupe est celle que l'on donne à une fraise à surfacer en acier rapide supérieur, de même diamètre.

Machine à fileter à l'outil.

La machine française CRI-DAN est une machine qui utilise l'outil de tour à fileter avec mise rapportée en carbure métallique. L'outil forme le filet classique par petites passes, mais la prise du copeau, l'avance de filetage, le recul de l'outil et son retour rapide à la position de départ sont entièrement automatiques. La pièce tourne constamment ; toutes les passes s'effectuent sans arrêt. Quand la vis est formée, l'outil revient au point de départ et s'arrête ainsi que la broche (*fig.* 5).

La machine a l'aspect d'un tour parallèle. La commande des chariots est obtenue par des systèmes de leviers et de cames. Le réglage des pas et de la longueur des filetages est rapide.

Cette machine exécute aussi les filetages intérieurs.

La vitesse de coupe utilisée est une vitesse normale de chariotage.

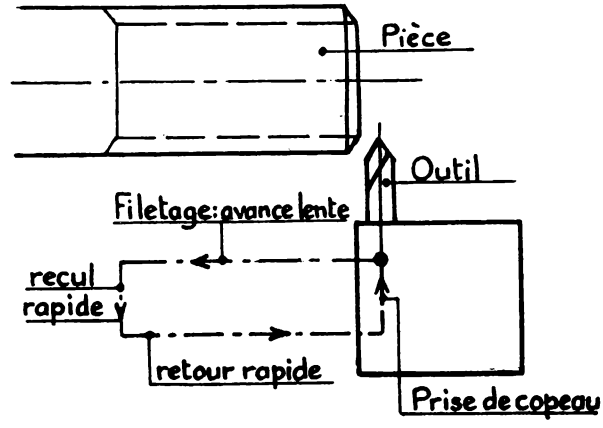


Fig. 5. — Schéma de la machine à fileter à l'outil Cri-Dan.

Machine à fileter avec peignes.

On utilise sur ces machines (*fig.* 6) 4 peignes tangentiels ou radiaux : c'est-à-dire une filière ouvrante, à déclenchement automatique (*fig.* 7 et 8). Les peignes tangentiels

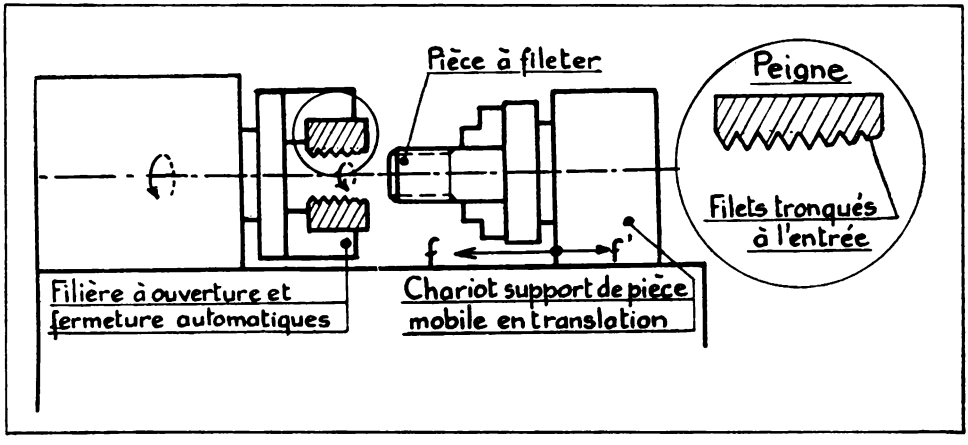


Fig. 6. — Machine à fileter à peignes Cuttat.

(*fig.* 7) sont plus utilisés que les peignes radiaux (*fig.* 8) parce qu'ils frottent moins sur la pièce et ont une plus grande longueur d'usure : on peut les réaffûter plus longtemps. En outre, l'arrosage en cours de travail est plus facile.

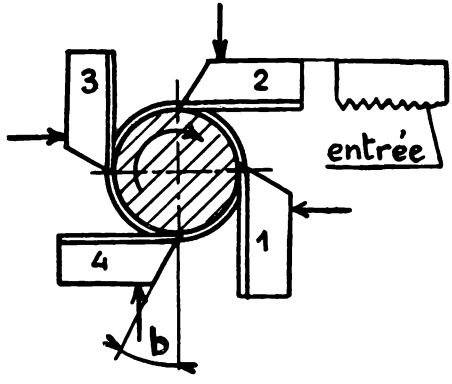


Fig. 7. — Mode d'action d'une filière à peignes tangentiels.

Quel que soit le type de peigne, la filière se ferme d'abord, puis on l'engage sur la pièce. Les peignes comportent naturellement, comme les filières à main une entrée, un cône d'action et une partie cylindrique qui calibre (*fig.* 6).

Quand la longueur à fileter est atteinte, la filière s'ouvre brusquement sous l'action d'une butée placée sur le chariot porte-pièce ; la pièce, dégagée, est ramenée en position de départ sous l'action d'un contrepoids agissant sur le chariot (ou sous l'action d'un levier actionné par l'opérateur).

2. — MACHINES OU L'OUTIL EST UNE MEULE

On rectifie les filets de précision à la meule, mais le même outil permet aussi de les tailler en pleine matière quand il s'agit de pas fins.

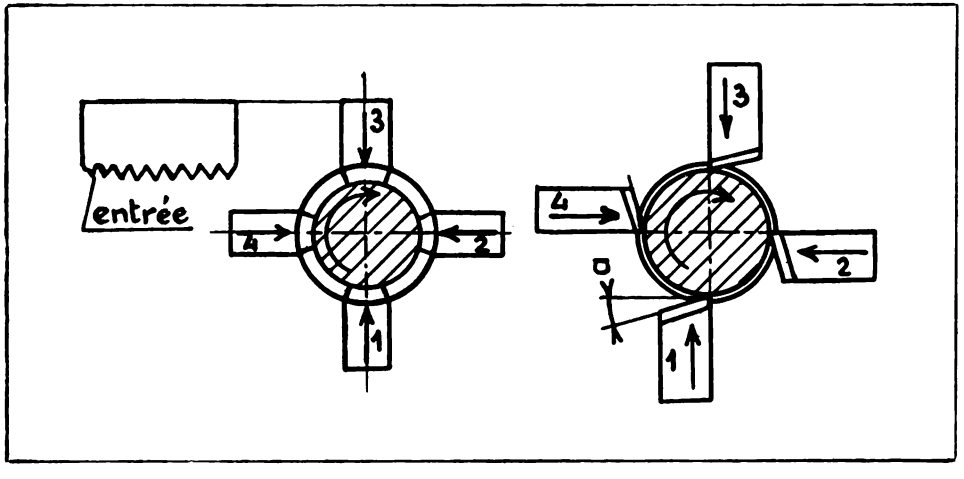


Fig. 8. — Mode d'action de filières à peignes radiaux.

Filetages extérieurs.

Les machines utilisées fonctionnent comme des machines à fraiser les vis : la meule remplace la fraise. Les meules sont de grand diamètre pour qu'elles gardent leur profil exact un temps suffisant entre deux affûtages (diamantage).

Meule à profil unique.

Cette meule est inclinée suivant la tangente à l'hélice du filetage (*fig.* 9). Elle est affûtée avec un diamant sur les deux flancs, exactement au profil à exécuter. Le diamant est

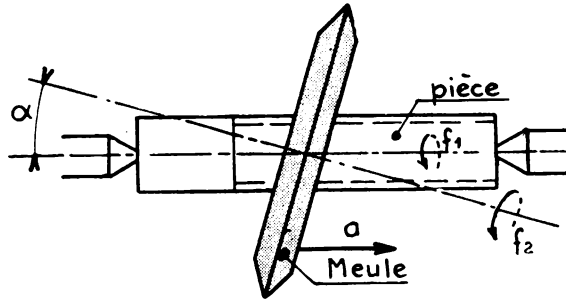


Fig. 9. — Exécution d'un filetage à la meule disque.

porté par un petit chariot, à l'arrière de la machine, monté sur une glissière réglable aux angles convenables. A chaque tour de pièce le chariot porte-meule avance parallèlement à l'axe de la pièce d'une quantité égale au pas ; ce mouvement doit être très précis : l'erreur admise est de $\pm$ 0,002 sur 250 mm (10 pouces). L'usinage nécessite plusieurs passes.

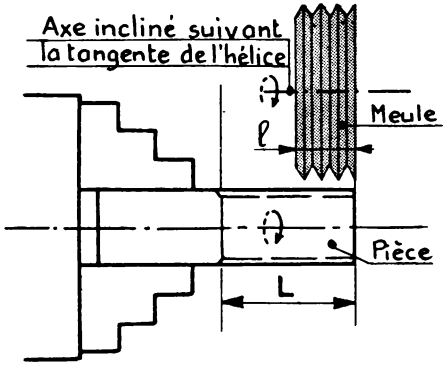


Fig. 10. — Exécution d'un filetage à la meule à cannelures cylindriques.

Machine à meule à profil multiple.

Principe : La meule porte des sillons circulaires *non hélicoïdaux* (*fig.* 10) comme la fraise à fileter.

Elle est inclinée comme la meule à tranchant unique suivant la tangente à l'hélice du filetage. Si la longueur à fileter est inférieure ou égale à la largeur de la meule, le meulage de tout le filet sera obtenu en faisant tourner la pièce d'un tour, en même temps que l'on produira son déplacement axial par rapport à l'outil, d'une valeur égale au pas à produire.

Si la longueur à fileter L est plus grande que la largeur l de la meule, le nombre de tours de la pièce devient $\frac{L}{l}$ et le déplacement $L\text{-}l$ (*fig.* 10).

Il faut évidemment une ou deux passes pour rectifier un filetage ébauché à l'outil, et plusieurs si le filet est taillé directement à la meule. Sur les machines modernes, le cycle de travail est entièrement automatique.

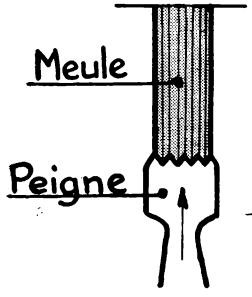


Fig. 11. — Affûtage d'un outil-meule à l'aide d'un peigne.

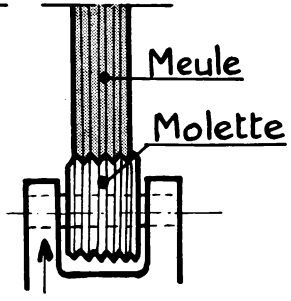


Fig. 12. — Affûtage d'un outil-meule à l'aide d'une molette.

Affûtage de la meule.

On affûte ces meules avec un peigne (*fig.* 11) ou avec une molette en acier très dur (crusber) (*fig.* 12). La vitesse de la meule pendant l'affûtage est réduite : 25 m/mn environ. Le peigne ou la molette sont poussés contre la meule progressivement. Quand on emploie la molette, on dit que la meule est affûtée par « écrasage ». Sur certaines machines, l'affûtage est exécuté avec un diamant qui se déplace devant la meule orientée en position de travail. Le diamant est commandé à l'aide d'un dispositif mécanique à came (*fig.* 13), ou hydraulique (*fig.* 14).

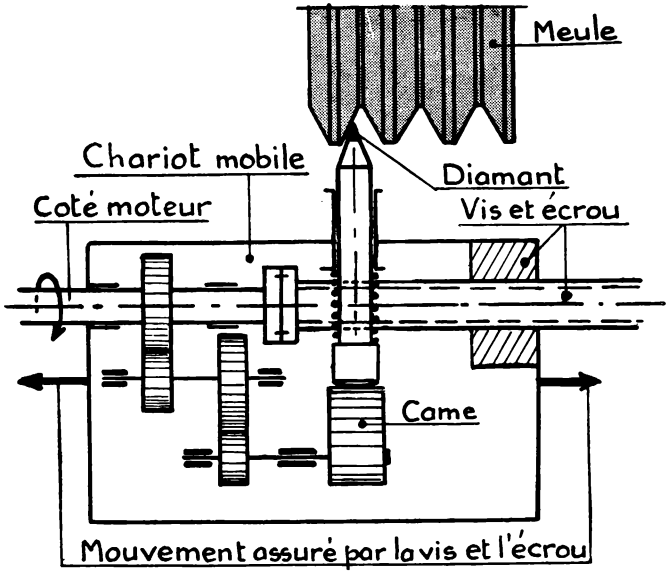


Fig. 13. — Affûtage d'un outil-meule au diamant porté par chariot à commande mécanique et à came.

Machine à meuler les filets intérieurs.

La meule doit avoir un petit diamètre afin de pouvoir s'engager dans l'avant-trou, et ceci limite le nombre d'applications possibles de ce procédé. Etant donné que l'usure de cette petite meule est très rapide, il est préférable de toujours ébaucher le filetage avec un outil classique à tranchant unique.

Machine à meuler les peignes de filières et les lames de forme.

Elle a l'aspect d'une machine à rectifier les surfaces planes. La plus connue est la machine THOMPSON (dite de true forming-conforming) sur laquelle la meule est profilée au moyen de deux molettes qui font l'une l'ébauche, l'autre la finition. Chacune des molettes est tour à tour outil d'ébauche et outil de finition (*fig.* 15) : on les remet au profil exact à l'aide de la meule fraîchement retaillée.

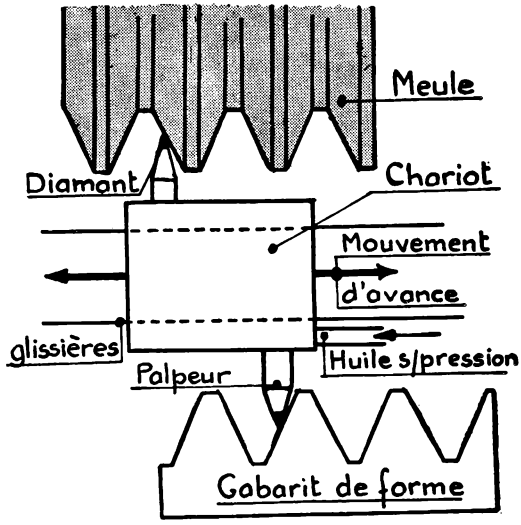


Fig. 14. — Affûtage d'un outil-meule à l'aide d'un diamant dont le déplacement à commande hydraulique est réglé par un reproducteur.

FILETAGE PAR DÉFORMATION DU MÉTAL DE LA PIÈCE

Obtention du filet par molettes circulaires : procédé PEE-WEE.

Deux molettes circulaires, en acier très dur, sont commandées à la même vitesse et dans

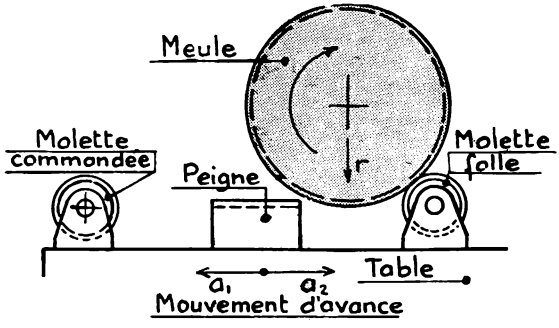


Fig. 15. — Affûtage des peignes à la meule.

le même sens (*fig.* 16). La pièce est engagée entre elles et repose sur une réglette. Un dispositif hydraulique écarte l'une des deux molettes pour permettre de placer la pièce,

puis la rapproche ensuite progressivement. Le filet est ainsi imprimé en quelques secondes sous un effort de 5 à 6 tonnes.

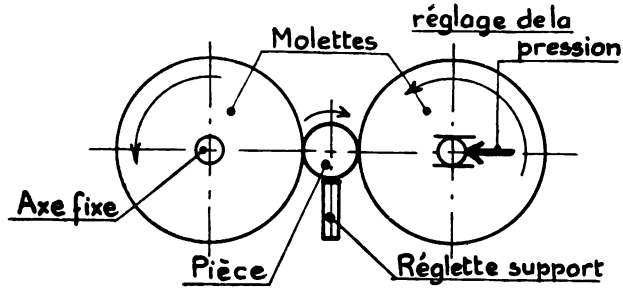


Fig. 16. — Filetage par déformation du métal à l'aide de molettes circulaires.

Chaque molette est une vis dont le filet a la même pente α que celle du filet de la vis à engendrer. Le diamètre des molettes est voisin de 160 mm. On a (*fig.* 17) :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{p}{\pi d}.$$

Il faut donc un jeu de molettes par pas et par diamètre de vis à usiner. La pièce tourne sur elle-même mais *n'a pas de mouvement* de translation par rapport à la molette. En effet : les filets de l'outil et de la pièce ayant la même pente, les triangles curvilignes MHP et M'HP sont égaux (*fig.* 17 *bis*) ; donc MP = M'P. Les vitesses circonférentielles de la molette et de la vis étant égales, le point M se superposera au point M' en H quand la pièce et la molette auront tourné de deux arcs égaux $\overset{\frown}{HM}$ et $\overset{\frown}{HM'}$. Il n'y a donc pas de translation de la vis.

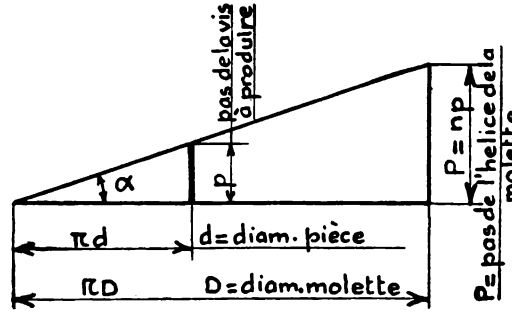


Fig. 17. — Le pas de la molette et son diamètre sont proportionnels au pas et au diamètre de la vis, on a donc $\pi D = n\pi d$ et $P = np$.

La *figure* 18 donne le schéma de principe de la machine PEE-WEE à commande hydraulique.

Productivité.

Il se produit nécessairement un gonflement du métal assez important : par exemple, avec un diamètre d'ébauche de 18,53, on obtient une cote nominale de 20, avec un pas de 2,5, sur de l'acier $(R_r)_e = 950$ N/mm² et A % = 25 %. La détermination du diamètre primitif impose une série d'essais préalables.

On n'usine, par ce procédé, que des métaux ou alliages ayant un allongement minimum de 5 %.

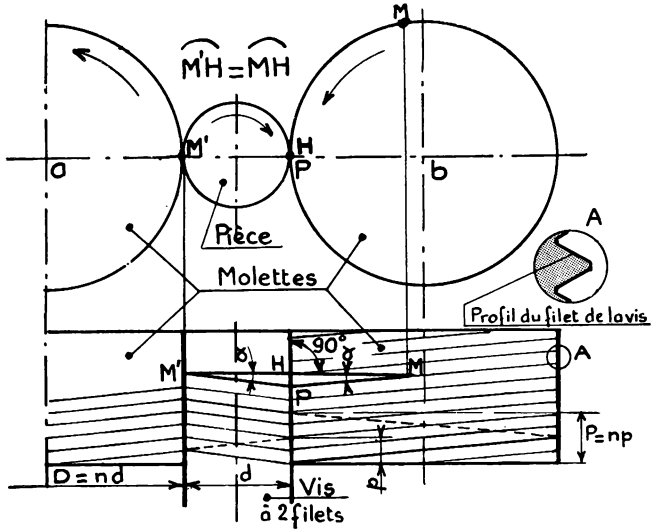


Fig. 17 *bis.* — Étude du filetage à la molette. Sur ce dessin on a supposé que l'on doit réaliser une vis à 2 filets. Le pas de la molette P = 2 *p*, donc D = 2 *d*.

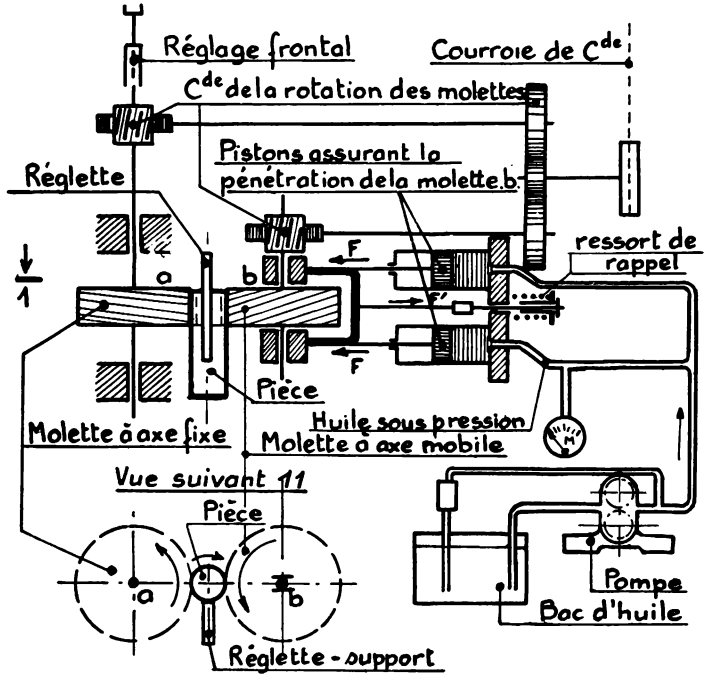


Fig. 18. — Machine à fileter à la molette Pee-Wee.

a) Ce procédé est extrêmement rapide.
On peut augmenter le rendement des machines en les équipant d'un dispositif électro-magnétique combiné avec un micro-mesureur Solex qui permet d'arrêter l'avance de la molette lorsque la cote est atteinte.

b) Ce procédé convient parfaitement aux travaux de grande série qui permettent d'amortir rapidement le prix élevé des molettes (600 à 800 F en 1961) ; rappelons qu'il faut un jeu de molettes par type de vis. L'usure des molettes est très lente et permet d'exécuter des séries très importantes.

c) Les vis obtenues sont plus résistantes à la traction et au cisaillement que les vis taillées parce que les fibres du métal ne sont pas coupées mais déformées.

L'écrouissage superficiel des filets rend le métal plus dur et plus résistant à l'usure par frottement.

Machine à rouler les filets.

Les machines Waterbury et National sont les plus répandues. Elles offrent une grande analogie avec la machine Pee-Wee : les molettes ont un rayon infini et deviennent des outils rectilignes. Ce sont des machines extrêmement productives mais elles sont surtout utilisées pour la production de vis dites de quincaillerie, de faible précision. Elles reçoivent alors une trémie de chargement dans laquelle les ébauches sortant du tour à décolleter automatique sont versées à la pelle. Certaines machines façonnent directement les ébauches par estampage du fil qui les alimente ; en outre, la pièce, une fois filetée, est reprise par une pince qui la présente devant une scie qui exécute le trait de tournevis. Ces machines sont entièrement automatiques ; un seul ouvrier en conduisant généralement toute une batterie.

Machine pour travail à l'enfilade.

Il existe des machines permettant, par déformation du métal, du travail à l'enfilade : vis de grande longueur, vis sans fin, taillage de pignons. L'étude de ces machines sort du cadre de cet ouvrage.

COMPARAISON ÉCONOMIQUE DES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS

Nous comparerons les machines suivantes :

tour à charioter et fileter ;

machine dite CRI-DAN (machine française) ;

machine à fileter à la fraise ROUCHAUD (machine française) ;

machine à outil-filière à peignes CUTTAT (machine française) ;

machine PEE-WEE (machine luxembourgeoise), ou sa copie française ESCOFFIER.

Voici quelques résulats obtenus par des élèves de l'École Nationale d'ingénieurs Arts et Métiers de Paris. La pièce à fileter a été choisie en acier mi-dur XC35 diamètre : 25 mm longueur : 100 mm. Elle a été filetée aux deux bouts sur 30 mm, au pas de

2,5. Les conditions de travail et les résultats sont groupés dans le tableau suivant et les courbes de la *figure* 19.

La comparaison fondée sur la rapidité d'exécution (*fig.* 19), valable, par exemple, pour réduire les délais de livraison, montre la supériorité incontestable de la machine PEE-WEE dès que la série est supérieure à 150 pièces.

La courbe (*fig.* 20) qui traduit les variations du coût de la main-d'œuvre (réglage initial, exécution du filet), en fonction du nombre de pièces, montre que le procédé Pee-Wee n'est économique qu'à partir de 400 pièces.

Enfin si l'on tient compte de l'amortissement de la machine et de l'outillage, ce nombre minimum de pièces pour la machine PEE-WEE atteint 20 000 pièces environ.

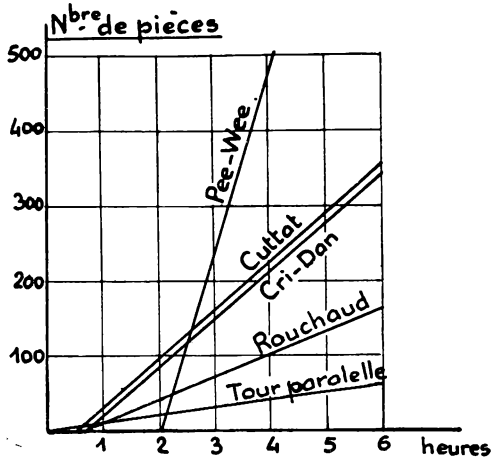


Fig. 19. — Diagramme de comparaison des différents procédés de filetage.

MACHINES	TOUR	CRI-DAN	ROUCHAUD	CUTTAT	PEE-WEE
Temps de réglage .	15 mn	45 mn	45 mn	30 mn	120 mn
Prix en F, en 1950.	700 000	1 200 000	607 000	508 000	1 900 000
Amortissement horaire	35 F	56 F	30 F	25 F	94 F
Prix de l'outillage .	300 F	600 F	3 000 F	6 000 F	40 000 F

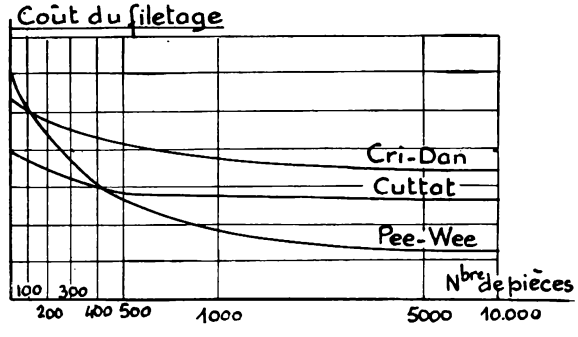


Fig. 20. — Diagramme de comparaison des différents procédés de filetage.

TARAUDAGE

Pour tarauder en emploie :

des machines à percer { ordinaires { avec taraud d'enfilade, avec appareil à tarauder, spéciales pour taraudage,

des tours à décolleter { avec porte-taraud à déclenchement, avec tarauds rétractiles,

des machines à tarauder.

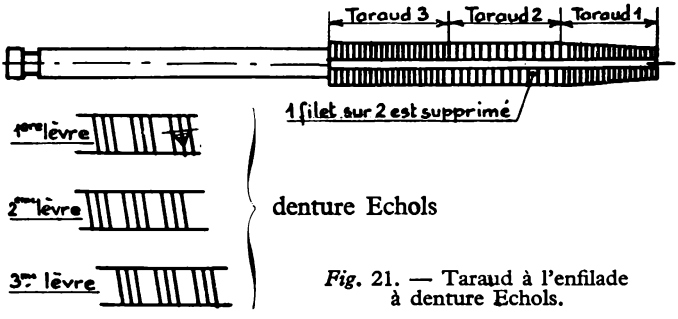


Fig. 21. — Taraud à l'enfilade à denture Echols.

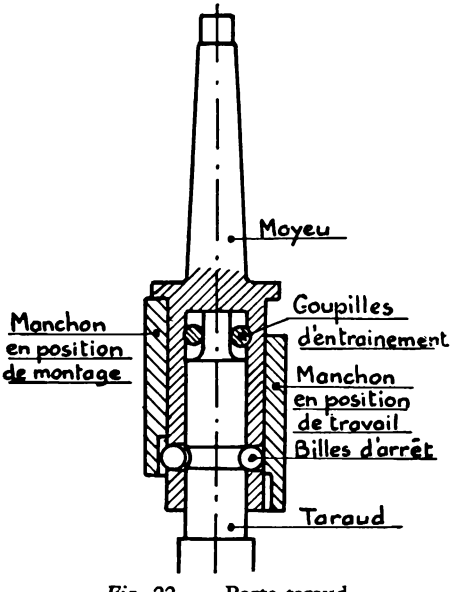


Fig. 22. — Porte-taraud à liaison rapide genre « Presto ».

Machines à percer.

a) *Taraud d'enfilade.*

Ce taraud n'est utilisable qu'avec trous débouchants : le taraud doit traverser le trou de part en part.

Ces tarauds sont longs car, sur leur partie coupante, on rassemble, à la suite, trois tarauds de série (*fig.* 21). Ils possèdent une longue queue.

Sur certains la partie moyenne B est réalisée en taille Echols : sur chaque lèvre on a supprimé un filet sur deux en alternant un creux et un plein de la lèvre suivante (*fig.* 21)

On place l'écrou dans un logement épousant la forme extérieure (drageoir). Le taraud est attelé à la broche généralement par un porte-taraud à liaison rapide (mandrin dit « Presto ») (*fig.* 22).

En appuyant sur le levier sensitif on fait mordre les premiers filets ; on accompagne ensuite à la main jusqu'à ce que le taraud traverse l'écrou à usiner (*fig.* 23). Celui-ci se place en 1 puis en 2, 3, etc. Quand la queue du taraud est garnie d'écrous on retire l'outil (ce qu'on peut faire sans arrêter la machine) et on jette les écrous. On remet le taraud en place et l'on continue. Ce procédé convient pour les séries même peu importantes.

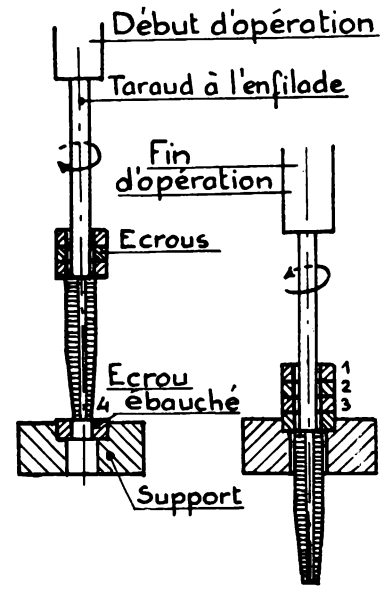


Fig. 23. — Opération de taraudage à l'enfilade.

b) *Appareil à tarauder.*

Cet appareil renferme un mécanisme de renversement de marche (pignons coniques ou galets de friction). Dès que le taraud bute dans le fond du trou borgne ou contre une butée prévue en conséquence, la broche de l'appareil recule légèrement et se met à tourner en sens contraire : le taraud se dévisse. La *figure* 24 représente un bon appareil à friction évitant tout bris de taraud.

Machines à percer spéciales.

Elles comportent toutes une broche qui peut tourner dans les deux sens : inverseur mécanique ou électrique. On monte le taraud sur un appareil à friction (*fig.* 25). L'entraînement du taraud se fait par l'intermédiaire de « dents de loup » maintenues en contact par ressort réglable d'après le diamètre du taraud. Quand le taraud en butant s'immobilise, les dents décrochent (bruit caractéristique) ; on inverse alors la rotation de la broche et le taraud se dévisse.

Taraudage sur tour à décolleter.

a) On place le taraud dans un porte-outil à déclenchement, monté sur la tourelle hexagonale (*fig.* 26). La broche B s'oppose à la rotation du taraud. On engage le taraud en agissant manuellement sur le cabestan de tourelle ; dès que le taraud est embecqueté la tourelle est mise en butée L, le taraudage se poursuit en provoquant le glissement de A dans C jusqu'à ce que B quitte son logement : à ce moment le taraud tourne entraîné par la pièce avant d'avoir atteint le fond du trou. On inverse le sens de rotation de la broche du tour puis, à la main, on engage la broche B dans son logement : le détaraudage s'effectue alors et la tourelle est repoussée.

Nota. — On monte de la même façon un porte-filière (pour filière ronde) pour produire des vis décolletées (*fig.* 27).

b) On peut employer aussi, quand le diamètre de filetage devient important, des tarauds « rétractiles » analogues aux alésoirs expansibles. Ici ce sont les

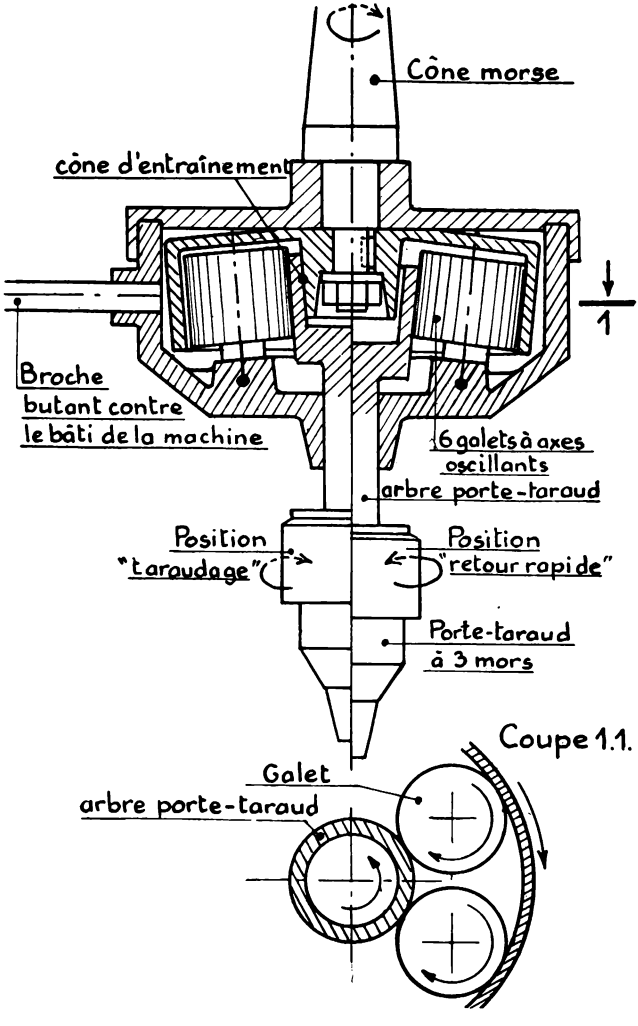


Fig. 24. — Appareil à tarauder.

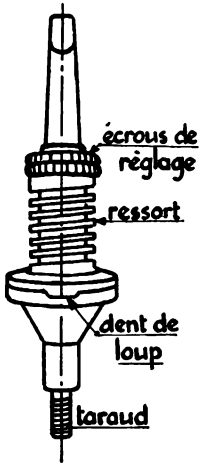


Fig. 25. — Appareil à friction pour machine à percer équipée spécialement pour taraudage.

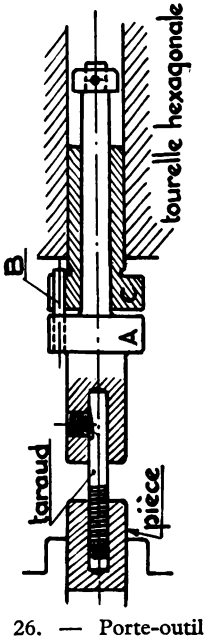


Fig. 26. — Porte-outil à déclenchement pour tour revolver.

lèvres en forme de peignes qui se reculent sous l'action d'une butée quand l'opération se termine : ainsi le taraud diminue de diamètre et on peut l'extraire par recul de la tourelle hexagonale.

Machines à tarauder.

Il en existe de nombreux modèles qui tendent surtout à augmenter la rapidité des manœuvres auxiliaires en diminuant aussi la fatigue de l'opérateur.

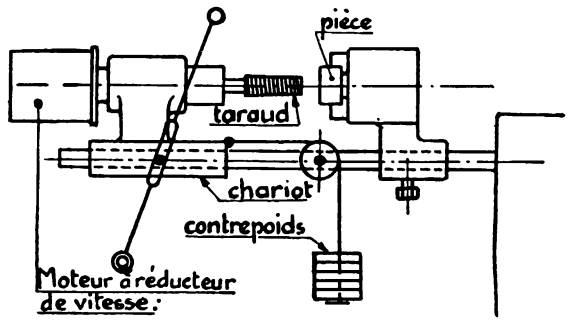


Fig. 27. — Machine à tarauder à contrepoids.

Généralement on met le taraud en rotation et on l'amène au contact de la pièce. Ce mouvement est le plus souvent manuel et obtenu au moyen d'un cabestan (*fig.* 28). Un contrepoids peut être substitué à l'action de l'ouvrier. Sur d'autres machines c'est la pièce qui est mise en rotation.

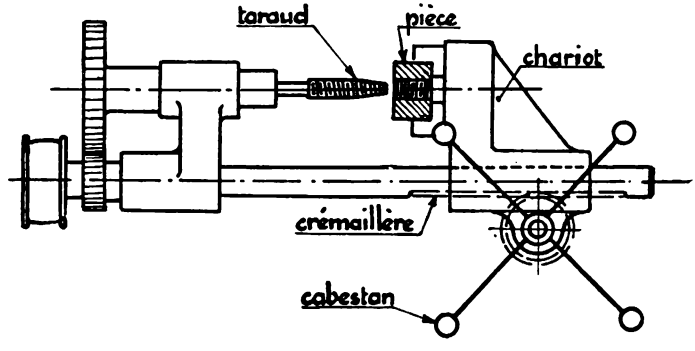


Fig. 28. — Machine à tarauder à cabestan.

Enfin ces machines peuvent être munies de distributeurs : trémies, glissières ; transporteur... et deviennent ainsi automatiques. Un même ouvrier peut alors en conduire plusieurs (*fig.* 27-28).

TRAVAUX D'ASSEMBLAGE

Les travaux d'assemblage comprennent :

— le montage des machines neuves,

— le démontage des machines à réparer et leur remontage.

1. — ORGANISATION DES TRAVAUX DE MONTAGE

1° Montage des ensembles.

Il doit être bien organisé pour être économique. C'est une phase de la fabrication et, à ce titre, il sera :

— pensé par le Bureau des études lors de la conception de la machine.

— préparé par le Bureau des méthodes : gamme de montage.

— exécuté dans un atelier spécialisé.

a) *Rôle du Bureau des études.*

Il fixe les conditions d'assemblage : cotes, tolérances, états de surface et établit soigneusement la nomenclature des pièces de la machine.

La nomenclature est la liste de toutes les pièces qui constituent l'appareil à construire : pièces fabriquées à l'usine et pièces achetées à l'extérieur. Pour faciliter le travail de collationnement et de stockage on subdivise la nomenclature en sous-ensembles. Par exemple : pour un tour parallèle, à charioter et fileter, les divisions de la nomenclature s'intituleront :

Poupée fixe, Contre-poupée, Porte-outil, Boîte de vitesses, Boîte des avances, Commande du porte-outil, Banc et pieds, Système d'arrosage, Graissage, Moteur et Appareillage électrique.

Sur les nomenclatures, les pièces produites par l'usine portent un repère numérique et les pièces à acheter un symbole particulier.

A l'aide de ces nomenclatures le service du Magasin Général s'assure que toutes les pièces nécessaires au montage sont bien en stock.

b) *Rôle du Bureau des méthodes.*

Le Bureau des méthodes établit non seulement pour chaque pièce la gamme des opérations d'usinage et la gamme de contrôle, mais aussi, pour les ensembles : le plan de montage et, pour chaque sous-ensemble, la gamme de montage.

Le plan de montage donne l'ordre dans lequel seront assemblés les différents éléments de l'ensemble. Ainsi, s'il s'agit de la fabrication d'un tour, le plan de montage indiquera l'ordre de montage des sous-ensembles : pieds et banc, poupée fixe, trainard, chariots, etc.

La gamme de montage établit l'ordre de montage des pièces qui constituent les sous-ensembles, prévoit les conditions de montage (à chaud, à froid, à la presse, etc.) précise les outillages à employer et impose les vérifications nécessaires.

Pour établir plus facilement les documents de montage et rendre l'exécution aisée on

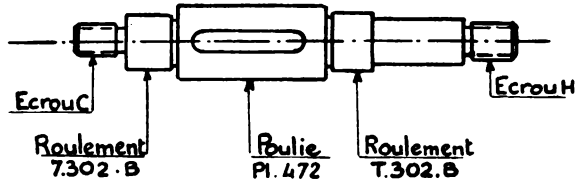


Fig. 1. — Dessin d'une pièce comportant les indications pour le montage.

y indique sur les plans de détail de chaque pièce, la position et les repères de celles qui s'assemblent avec elle (*fig.* 1).

2° Principe de réalisation des montages.

a) *Création des sous-ensembles.*

Dans les ateliers de construction mécanique on s'efforce, par souci d'économie, de respecter la règle suivante :

On ne doit pas retoucher les pièces en cours de montage.

L'usinage doit donc être précis et les pièces doivent être contrôlées systématiquement avant.

Par exemple : En construction automobile, on a supprimé tous travaux d'ajustage sur les chaînes de montage.

Lorsque la précision de fonctionnement des différents organes d'une machine est très grande (machine-outil par exemple) il est parfois nécessaire de prévoir quelques travaux d'ajustage en cours de montage. Ces retouches, toujours très onéreuses, doivent être exceptionnelles car la pièce retouchée est toujours hors cotes et n'est plus interchangeable.

b) *Réglage des jeux de fonctionnement.*

Le respect des jeux de fonctionnement, maximum et minimum, par simple ajustement nécessite une précision d'exécution coûteuse. On peut en diminuer le coût par l'emploi des pièces d'appoint pour régler les jeux de fonctionnement qui seront contrôlés au moyen de dynamomètres pour les chariots et de couplemètres pour les broches (mesure du couple minimum déterminant la mise en rotation).

Considérons une pièce A qui doit coulisser dans une pièce B (*fig.* 2). Supposons que cet ensemble fonctionne correctement quand le jeu maximum est inférieur à 40 microns et supérieur à 10 microns.

La cote nominale est 80 mm. Si nous fixons à 80,00 la cote minimum de la rainure taillée dans la pièce B un raisonnement très simple nous permet de définir les cotes de l'ajustement :

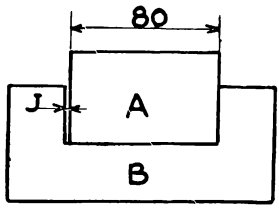


Fig. 2. — Assemblage de deux pièces A et B avec jeu.

Pièce B : cote de la rainure : 80^{+20}_{00}

Pièce A : largeur 80^{-10}_{-20}

Nous constatons que l'intervalle de tolérance à respecter pour la pièce A est très faible : 10 microns. Son usinage est donc difficile et coûteux. Il peut être intéressant de réaliser la pièce A avec une tolérance supérieure : par exemple 80^{00}_{-40} et de régler le jeu à l'aide d'une pièce d'appoint. Deux solutions sont possibles (*fig.* 3 et 4).

Le jeu de fonctionnement j résulte des valeurs de la cote a et de la cote b :

$$j = b - a$$

Dans le cas de la *figure* 3 la pièce d'appoint est constituée par un empilage de plaquettes

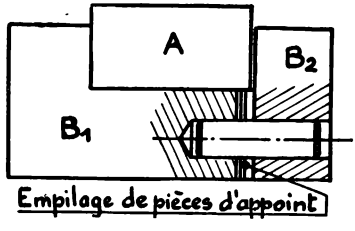


Fig. 3. — Réglage du jeu à l'aide d'un empilage de pièces découpées.

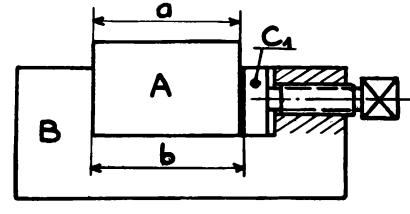


Fig. 4. — Réglage du jeu à l'aide d'une cale poussée par vis.

découpées dans du clinquant d'aluminium ou de laiton. Des pièces sont vendues à la demande en différentes formes et en rondelles dans les épaisseurs suivantes :

0,01 — 0,02 — 0,05 — 0,1 — 0,2 — 0,5 — 1-2-5 mm

On peut ainsi réaliser des combinaisons qui permettent, dans tous les cas, de régler le jeu à 1/100 mm près.

c) *Montage de plusieurs pièces empilées.*

L'étude de ces montages montre que les cumulations des tolérances d'usinage conduisent à des jeux de fonctionnement exagérés ou à des tolérances d'usinage trop faibles.

Raisonnons sur un cas précis :

La *figure* 5 est la représentation simplifiée du dispositif de commande d'un différentiel d'automobile à traction avant. La transmission du mouvement est correcte, étant donnée la précision de taillage des pignons, si la cote F est respectée à $\pm$ 50 microns, on doit donc avoir :

$$F^{+50}_{-50}$$

Supposons des tolérances de la qualité 7 ou 8 relatives aux différents éléments du

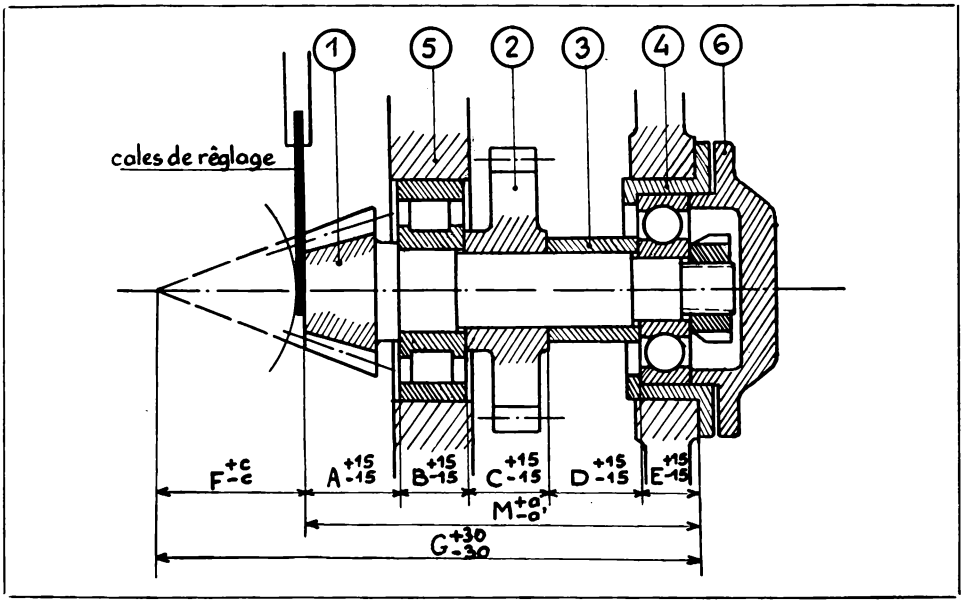


Fig. 5. — Dispositif de commande de différentiel.

montage. Pour simplifier nous les supposerons égales à $\pm$ 15 microns.

Les tolérances a et a' de la cote globale M ont pour valeur

$$a = + 15 + 15 + 15 + 15 + 15 = + 75$$
$$a' = - 15 - 15 - 15 - 15 - 15 = - 75$$

On a donc : $M^{\pm 75}$

Supposons que la cote de position de G puisse être réalisée à $\pm$ 30 on aura :

$$F^{+c}_{-c'} = G^{+30}_{-30} - M^{+75}_{-75} = (G - M)^{+30+75}_{-30-75} = F^{+105}_{-105}$$

La tolérance obtenue pour F devient excessive.

Si l'on veut ramener ces tolérances aux valeurs imposées par les conditions de fonctionnement $\pm$ 50 il faut diminuer les tolérances de G, de M et avoir, par exemple :

$$F^{+50}_{-50} = G^{+10}_{-10} - M^{+40}_{-40}$$

Comme $M = A + B + C + D + E$,

on pourrait choisir :

$$A^{+8}_{-8}, B^{+8}_{-8}, C^{+8}_{-8}, D^{+8}_{-8}, E^{+8}_{-8}.$$

Ces intervalles de tolérances très faibles rendent l'usinage extrêmement difficile et coûteux.

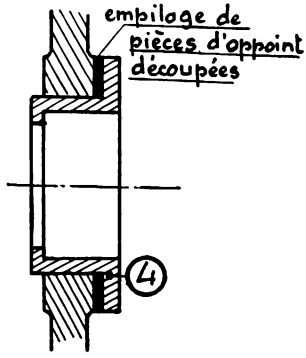


Fig. 6. — Réglage de position de pièce par empilage de pièces d'appoint.

La solution économique consiste à réaliser les différentes cotes avec une précision normale et à prévoir, sous la collerette de la douille 4, des pièces d'appoint découpées dans des clinquants (*fig.* 6). On détermine la valeur de l'empilage en clinquant en mesurant le jeu qui doit exister entre le moyeu de la couronne et l'extrémité de l'arbre. Ce jeu a été défini au cours de l'opération de rodage des pignons coniques en mesurant les positions respectives des deux éléments de l'engrenage conique.

2. — EXÉCUTION DU MONTAGE

Montage d'un appareil unique.

Les *petits appareils* sont montés, selon les cas, sur des marbres à pieds, sur des établis ou sur des « supports-berceaux » orientables autour de deux ou trois axes (articulation à la Cardan).

Le travail est confié à un seul ouvrier. On n'établit pas toujours un plan de montage. Le plus souvent on remet à l'ouvrier les plans d'ensemble ; il les étudie et établit lui-même, groupe par groupe, l'ordre d'assemblage.

L'appareil monté est essayé en usine avant d'être livré.

Les *gros appareils* sont montés en usine pour essai et mise au point ; on les démonte ensuite pour les expédier et un monteur se rend ensuite chez le client pour faire l'assemblage final. Quelquefois le montage est fait directement chez le destinataire où l'on expédie les pièces détachées (machines d'imprimerie par exemple, machines de papeterie...). Le montage, en usine, est réalisé sur une assise en fonte munie de rainures en T «taque» ou plate-forme ou sur une assise en béton soigneusement nivelée. Le montage chez le client se fait sur un bloc en béton prévu à cet effet. Le travail est confié à une équipe de monteurs.

Un plan de montage, établi avec soin, prévoit notamment les appareils de vérification et les engins de manutention indispensables.

Montage d'appareils ou de machines en petite série.

Organisation du travail.

L'organisation du travail dépend de la constitution de l'appareil à monter et de la production journalière.

L'appareil à monter est constitué de plusieurs sous-ensembles. Le plan de travail prévoit le montage séparé des sous-ensembles, puis le montage de la machine par assemblage des sous-ensembles dans un ordre bien défini.

Une étude détaillée permet de connaître le temps nécessaire au montage des différents sous-ensembles ce qui permet d'établir le « planning » du montage de la machine ainsi que le délai de livraison. La cadence de production journalière imposée justifie le développement et l'installation des chaînes de montage partiels et de la chaîne finale.

Pour les pièces lourdes le montage s'effectue, en général, dans un hall équipé d'un ou deux ponts roulants et l'appareil en cours de montage est fixe ; c'est l'ouvrier qui se déplace et qui passe successivement d'un appareil à un autre.

Les appareils sont disposés les uns à côté des autres (*fig.* 7) et constituent une chaîne de montage. Imaginons une machine constituée par trois sous-ensembles. Voici la suite des opérations de montage :

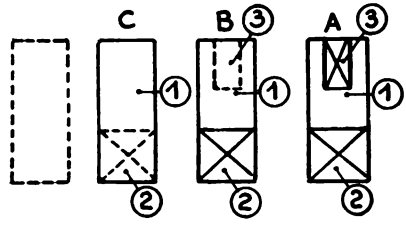


Fig. 7. — Montage de pièces lourdes les ouvriers se déplacent.

Premier temps. — L'ouvrier 1 monte le sous-ensemble 1 en A.

Deuxième temps. — L'ouvrier 1 monte le sous-ensemble 1 en B.
L'ouvrier 2 monte le sous-ensemble 2 en A.

Troisième temps. — L'ouvrier 1 monte le sous-ensemble 1 en C.
L'ouvrier 2 monte le sous-ensemble 2 en B.
L'ouvrier 3 monte le sous-ensemble 3 en A,
et ainsi de suite...

Les ouvriers 1, 2 et 3 constituent une équipe de montage.

Il est bien évident que les temps de montage des différents sous-ensembles doivent être sensiblement égaux (au besoin un sous-ensemble peut être monté en deux temps en y faisant travailler successivement deux ouvriers).

Nombre d'ouvriers nécessaires au montage.

Le nombre d'ouvriers devant intervenir dans le montage peut être calculé aisément.

Désignons par :

m le nombre d'appareils à produire par jour ;

t le nombre d'heures qu'il faut pour monter un appareil.

Le nombre total d'heures de montage pour m appareils est :

$$T = mt$$

Puisqu'un ouvrier fournit 8 heures de travail par jour il faut prévoir :

$$n = \frac{T}{8} = \frac{mt}{8} \text{ ouvriers.}$$

Si ces n ouvriers constituent une équipe de montage, ils produiront ensemble m appareils par jour. Si ces n ouvriers sont divisés en 2, 3, 4 équipes, chacune d'elles montera $\frac{m}{2}$, $\frac{m}{3}$, $\frac{m}{4}$ appareils par jour.

On aura alors plusieurs chaînes de montage que l'on pourra disposer soit parallèlement, soit en ligne (*fig.* 8).

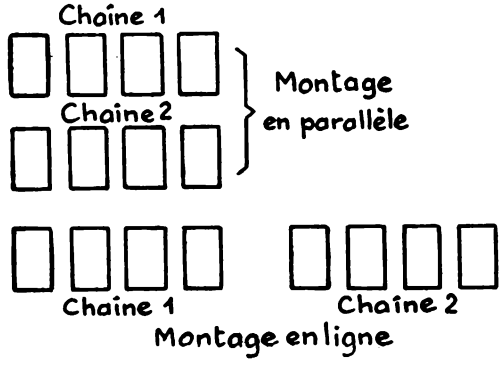


Fig. 8. — Chaînes de montage en parallèle et en ligne.

EXEMPLE Supposons que l'on ait à monter des tours à charioter et fileter. La production journalière doit être de $m = 4$ tours.

Le temps nécessaire au montage du tour à partir de sous-ensembles montés est de 32 heures. Le nombre d'ouvriers qui doivent intervenir dans ce travail est de :

$$n = \frac{4 \times 32}{8} = 16.$$

Le plan de montage a prévu des tâches de durées sensiblement égales. On peut le résumer ainsi :

N°	DÉSIGNATION DE L'OPÉRATION	DURÉE	NOMBRE D'OUVRIERS
		heures.	ouvriers.
1	Montage du banc sur pied, de la boîte de vitesses et de la boîte d'avances.	2	1
2	Montage poupée fixe et contre-poupée	2	1
3	Montage chariots. Barre de chariotage. Vis-mère.	2	1
4	Montage moteur électrique. Équipement électrique. Dispositif d'arrosage	2	1
	Total pour un tour.....	8	4

Il y aura donc à prévoir : $\frac{16}{4} = 4$ chaînes de montage, identiques à celle qui est représentée sur la *figure* 9.

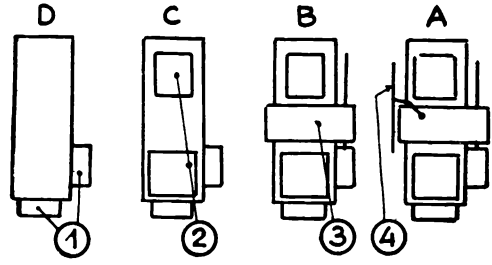


Fig. 9. — Chaîne de montage avec équipe de 4 ouvriers 1, 2, 3, 4.

ORGANISATION DU TRAVAIL

Le hall de montage possède au moins un pont roulant. Les différents sous-ensembles sont montés, en général, sur des établis, dans une ou deux nefs latérales. Si le poids des éléments dépasse 30 kg on installe un monorail au-dessus des tables de montage, monorail qui assure en outre le transport des sous-ensembles finis dans le hall principal de montage (*fig.* 10).

Le pont roulant sert à manutentionner les sous-ensembles pour les présenter sur les machines en montage et à transporter les machines terminées à la peinture d'abord, à l'expédition ensuite.

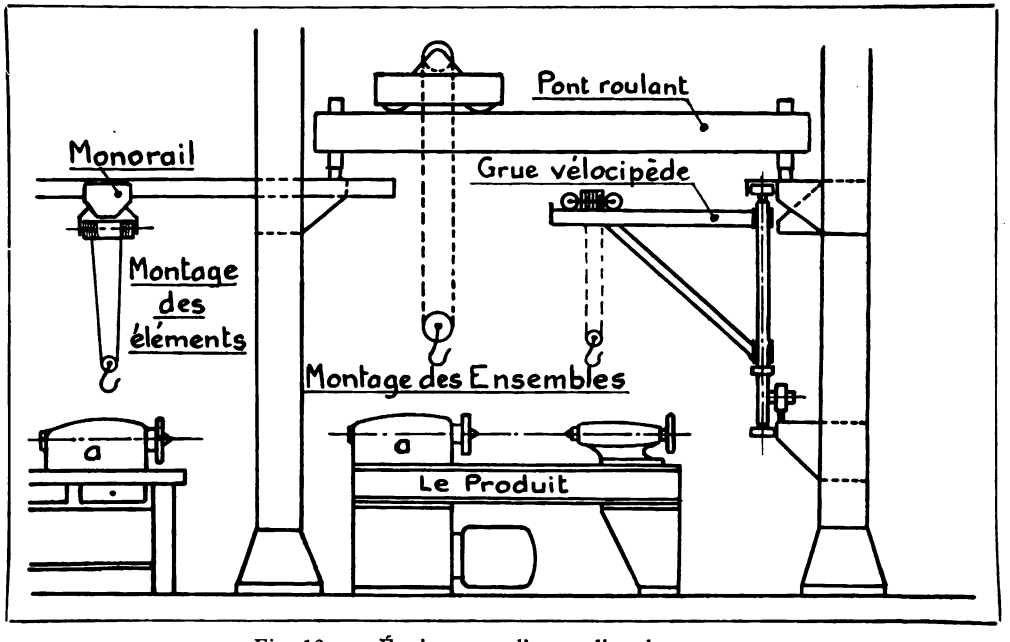


Fig. 10. — Équipement d'un atelier de montage.

On peut avantageusement équiper le hall de montage de plusieurs grues roulantes qui aident à la mise en place rapide des éléments en montage et qui sont d'utilisation plus économique que le pont.

MONTAGE D'APPAREILS OU DE MACHINES EN GRANDE SÉRIE

Lorsque le nombre d'appareils à monter est important, et que la fabrication en est envisagée pour plusieurs années, on a intérêt à diminuer les temps improductifs, le plus souvent dus aux déplacements de l'ouvrier ou aux manutentions des pièces. Les monteurs, dans ce cas, doivent rester à *poste fixe* et les produits en montage doivent se déplacer devant eux : c'est le montage à la chaîne.

La division du travail doit être très poussée : des études de gestes précises en sont la base. Il faut, en effet, pour réaliser le déplacement continu des appareils en montage, que les ouvriers accomplissent tous leur opération dans le même temps. La durée de la tâche de chacun dépend de la cadence de fabrication.

Supposons que le temps de montage d'un appareil soit de 2 heures. Un seul monteur exécuterait le travail en 2 heures et, en une journée de 8 heures, il monterait 4 machines. Si l'on décompose le travail de montage, l'ouvrier accomplit moins d'opérations et les répète plus souvent : sa dextérité augmente et les temps d'assemblage se réduisent. Si nous supposons que dans ces conditions le temps total de montage soit ramené à 1 h 30 mn, soit 90 mn, avec une équipe de 45 ouvriers, chaque opération durera :

$$\frac{90}{45} = 2 \text{ mn.}$$

La cadence horaire de production de l'équipe est alors :

$$\frac{60 \times 45}{90} = 30 \text{ appareils.}$$

Or, si l'ouvrier fait le montage complet, il lui faut 2 heures et les 45 ouvriers n'assureraient, dans ces conditions, qu'une cadence horaire de :

$$\frac{45}{2} = 22{,}5 \text{ appareils.}$$

D'où l'intérêt du montage à la chaîne.

Réglage de la production dans le montage à la chaîne.

Lorsque le raientissement des ventes impose une nouvelle cadence de production, on diminue le nombre des ouvriers-monteurs de l'équipe et l'on confie plusieurs opérations à un même ouvrier.

Si la cadence de production doit diminuer des 2/3 (c'est-à-dire passer de 30 à 20 appareils), le nombre d'ouvriers de l'équipe passera de 45 à $45 \times \frac{2}{3} = 30$. La durée des opérations confiées à chacun d'eux passera à 2 mn $\times \frac{3}{2} = 3$ mn par appareil.

Une augmentation de cadence pourrait être envisagée de la même façon en augmentant le nombre d'ouvriers auxquels des tâches plus courtes seraient alors confiées. La limitation de ce réglage résulte de la possibilité de trouver un nombre suffisant d'opérations de même durée.

MANUTENTION DES ORGANES EN MONTAGE

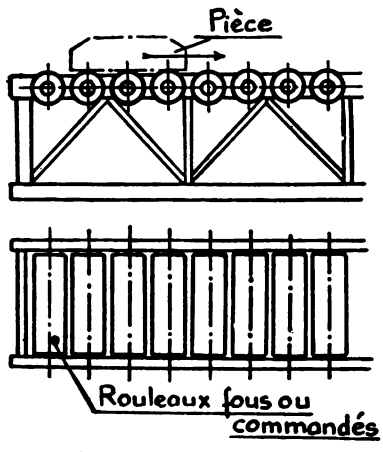


Fig. 11. — Transrouleur.

Le passage des appareils d'un poste de travail au suivant peut être effectué manuellement ou mécaniquement :

1° Transfert manuel.

On peut :

- — faire glisser les petits appareils sur la table, sur des fils tendus ou sur des rails ;
- — pousser les appareils, plus lourds, sur des rouleaux : transrouleurs (*fig.* 11) ;
- — exécuter le montage de chaque appareil en le plaçant sur un chariot qu'on fera rouler sur une table, ou sur le sol, en le guidant par des rails.

Ces solutions sont valables quand la durée des opérations est relativement longue et susceptible de varier sensiblement d'un appareil à un autre (réglage de certains organes par exemple : cas des moteurs...) Il faut alors prévoir la place pour un ou deux chariots en attente entre chaque poste de travail. On constitue ainsi un « volant régulateur » ; les opérateurs s'entr'aident d'ailleurs souvent pour éviter une accumulation excessive et le blocage de toute la chaîne. La cadence n'est pas rigoureusement imposée : elle varie en cours de journée et dépend de l'activité des membres de l'équipe (qui sont d'ailleurs tous solidaires et intéressés globalement à la production).

2° Transfert mécanique.

On a le choix entre plusieurs solutions :

a) *Tapis-courroie à vitesse réglable* (*fig.* 12).

C'est l'un des plus anciens dispositifs utilisés.

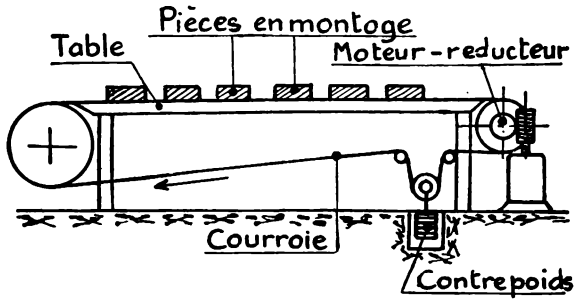


Fig. 12. — Montage des pièces sur chariots.

L'ouvrier saisit les appareils sur le tapis et les y replace. Pour éviter les embouteillages, des dispositifs de contrôle électriques arrêtent la translation pendant la durée de la perturbation : pièce placée sur le tapis et non prise par le monteur. La courroie glisse sur une table ; sa vitesse est réglée par le chef de chaîne au moyen d'un variateur. La vitesse de déplacement est souvent mise en évidence sur un cadran visible par toute l'équipe et qui indique la cadence de

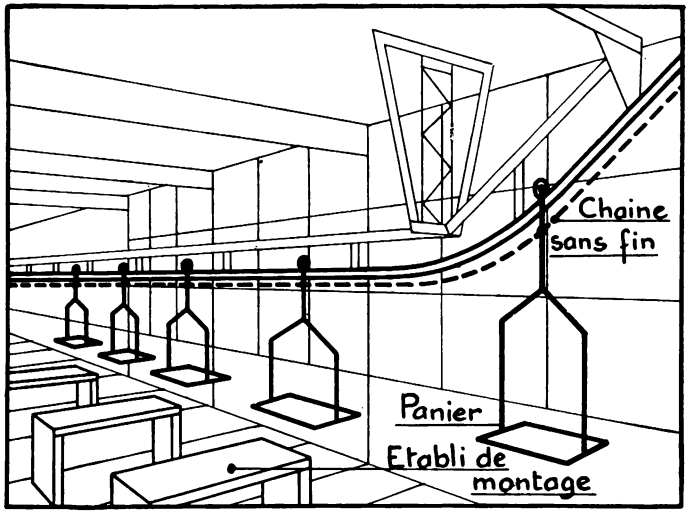


Fig. 13. — Tapis-courroie à vitesse réglable.

production obtenue à chaque instant. Chaque opérateur a un stock de pièces placé devant lui dans des casiers dont l'étude rationnelle est souvent très poussée (simplification du travail, étude des gestes).

b) *Dispositifs suspendus.*

Les éléments en cours de montage peuvent être :

— disposés dans des paniers suspendus à une chaîne sans fin animée d'un mouvement continu ou périodique de translation (*fig.* 13),

— pendus à des crochets liés à une chaîne sans fin se déroulant dans le plan horizontal.

Ce mode de transport est dit à « balancelles » en raison du mouvement pendulaire pris par les pièces ou les paniers pendant leur déplacement. Les établis sont ainsi complètement dégagés des sous-éléments obtenus et peuvent être approvisionnés plus largement en pièces détachées.

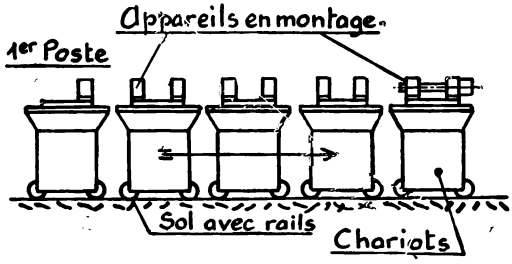


Fig. 14. — Transport des pièces sur paniers supendus.

c) *Appareils montés sur des chariots entraînés par une chaîne sans fin logée dans le sol* (*fig.* 14).

Cette solution a été adoptée dans l'industrie de l'automobile, le véhicule lui-même remplaçant le chariot.

Le châssis (ou le plancher) de la voiture est muni rapidement de ses roues sur lesquelles il se déplace jusqu'à l'extrémité de la chaîne où son moteur est mis en route, le véhicule partira alors pour exécuter les essais sur piste.

Organisation de la manutention dans un atelier de montage

La *figure* 15 représente le plan d'un atelier de montage de châssis d'automobile.

La préparation des sous-ensembles se fait dans des ateliers différents : moteur, boîte de vitesses, direction, train AV, pont AR.

Dans l'allée centrale ces sous-ensembles sont montés sur le châssis.

Les chaînes de montage des sous-ensembles sont alimentées en pièces détachées par des transporteurs aériens sans fin.

L'alimentation doit toujours être surabondante et, de ce fait, une pièce n'est pas toujours saisie à son premier passage devant le monteur ; elle continue son voyage et revient plus tard. Toutes les pièces placées sur les transporteurs constituent un important magasin en mouvement qu'on a appelé pour cela « magasin tournant ».

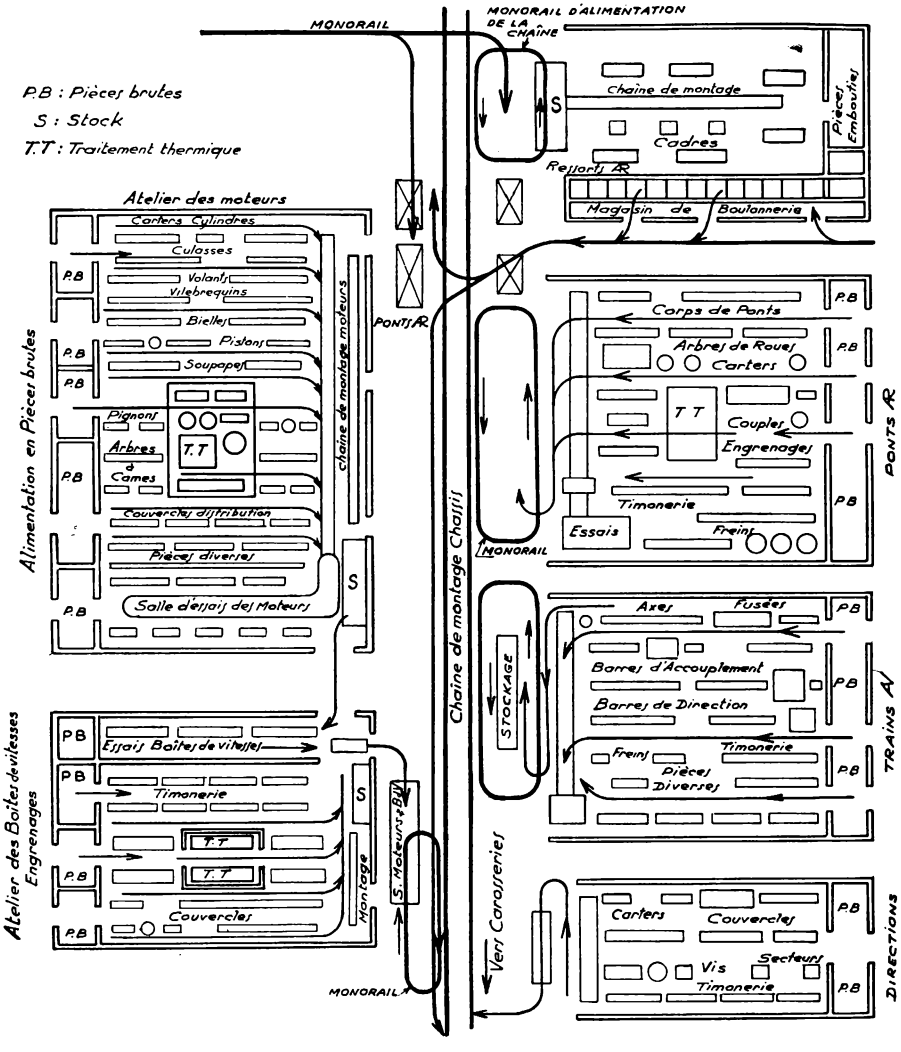


Fig. 15. — Chaîne de montage d'automobiles : sur les côtés montages partiels : moteur, boîtes de vitesses, cadres, ponts arrière, train avant, direction, et dans l'allée centrale, montage de l'ensemble.

OUTILLAGE DE L'ATELIER DE MONTAGE

L'outillage de montage sert à la mise en place des organes et à leur fixation définitive, au moyen de vis, de boulons, de rivets, de ressorts ou par serrage (à chaud ou à froid).

L'outillage est conçu pour :

— accélérer la mise en place des pièces,

— contrôler l'opération réalisée,

— éviter la fatigue musculaire de l'opérateur en n'exigeant de lui que des mouvements faciles et peu pénibles.

Pour accélérer la mise en place des pièces, il importe de respecter les règles suivantes :

- Les pièces en montage doivent être disposées de façon à favoriser l'action de l'opérateur : emploi de supports orientables.
- La prise des pièces détachées doit tenir compte des conditions les plus favorables du déplacement des bras : le poste de travail doit être étudié du point de vue de l'homme.
- Les clés et les tournevis seront électriques ou pneumatiques. On les maintiendra suspendus au-dessus des postes de travail au moyen de ressorts faciles à déprimer par traction verticale.

  Certaines clés comportent un dispositif de limitation du couple exercé (clés dynamométriques).
- La mise en place des rivets et l'exécution des points de soudure seront assurés au moyen de riveteuses et pinces de soudage suspendues dans les mêmes conditions et équilibrées par des contrepoids.
- Tous les câbles électriques et les tuyauteries descendront du plafond. En aucun cas leur poids ne doit être, même partiellement, supporté par l'opérateur.
- La pression de rivetage et la durée du soudage seront contrôlées automatiquement par des dispositifs électroniques de plus en plus souvent.
- Le montage avec serrage de certains roulements, de bagues ou de frettes est réalisé avec des presses hydrauliques ou pneumatiques mises à la disposition du monteur près des fours de chauffage ou des bacs d'azote liquide.

  Le marteau sera toujours interdit. La massette, en plomb ou en fibre, est parfois tolérée (cas d'espèce).
- Des outillages spéciaux sont souvent indispensables pour mettre en place les ressorts et réaliser leur tarage. On en crée aussi pour placer les goupilles, les freins d'écrous et les freins à bille, les aiguilles dites « Nadella »...

- L'outillage de contrôle : niveaux de précision, comparateurs, lunettes d'alignement, jeux de cales, mesureur de couple de rotation des arbres, etc., fait aussi l'objet d'études souvent complexes.
- Enfin on doit étudier de très près tout ce qui a trait à la sécurité des ouvriers. Aucune économie ne doit être faite qui la réduirait. L'ouvrier doit pouvoir travailler sans appréhension et sa productivité n'en est que meilleure.

TECHNIQUE DU MONTAGE

Le montage d'un appareil ou d'une machine est une opération de finition et, comme telle, elle doit être très soignée.

L'ouvrier, même s'il n'exécute qu'une opération de montage très limitée doit connaître parfaitement l'ensemble au bon fonctionnement duquel il participe. Chaque pièce a un rôle bien défini qu'il est souhaitable de préciser au monteur qui apportera ainsi plus d'intelligence dans l'accomplissement de sa tâche et qui aura conscience de sa responsabilité. La clientèle ne peut qu'en être davantage satisfaite.

Soins à apporter au montage.

Les pièces à assembler seront très propres et, au besoin, dégraissées au trichloréthylène ; un lavage est souvent nécessaire pour éliminer cambouis, poussières et petits copeaux.

Les carters des boîtes de vitesses doivent être soufflés pour éliminer toute trace de sable démoulage. On les peint souvent en blanc ou en jaune afin de vérifier facilement qu'aucun organe étranger n'y demeure ; en outre, on évite ainsi que du sable, des particules métalliques y restent libres.

Tout heurt, tout choc doit être épargné aux pièces et, pendant les manutentions, on protège en particulier les parties rectifiées : tubes, cartons, plastiques, chiffons graissés... On place les pièces fragiles dans des caisses alvéolées ou sur des supports de forme en bois. Les pièces assemblées légèrement serrées doivent se monter sous effort statique uniquement. La pénétration d'un arbre dans son logement est facilitée par un mouvement hélicoïdal de mise en place : (mouvement louvoyant). Ne pas oublier, bien sûr, de graisser!

Les vis et les boulons seront graissés avant montage car il faut penser aux possibilités de démontage ultérieur.

Opérations d'usinage à réaliser au cours du montage.

En principe on ne doit effectuer aucune retouche au montage. Les pièces d'appoint assurent le réglage rapide des jeux de fonctionnement. La seule opération d'usinage qui puisse être acceptée est la pose des « goupilles de position » aussi appelées « pieds de centrage ». Ces broches se montent généralement par paire, et sont en acier étiré

ou en acier Stubbs ; elles sont emmanchées « dur » dans l'une des pièces et « glissant » dans l'autre dont la position par rapport à la première est ainsi bien définie. Dans quelques cas il est préférable de les faire coniques (démontages fréquents envisagés). Le diamètre des broches de position varie de 6 à 10 mm environ. Pour un diamètre plus important l'outillage portatif de perçage et d'alésage devient trop lourd et le monteur se fatigue davantage.

Prenons un exemple concret pour préciser la manière d'opérer pour placer deux pieds cylindriques.

Supposons que l'on ait à aligner deux supports tels que S afin d'assurer la position et le fonctionnement corrects de l'arbre A (*fig.* 17).

Le support S comporte les trous pour le passage des vis V (avec jeu) et ceux G, pour les pieds, percés à un diamètre d-0,1.

On monte les supports, on fait l'alignement puis l'on bloque les vis V. On contreperce alors les trous G au diamètre d-0,1 en se servant de S comme guide de perçage.

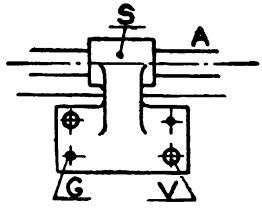


Fig. 16. — Alignement de supports.

On démonte les supports et on emmanche à force les pieds dans le bâti ; on alèse les trous G des supports à la cote d et on procède au montage final.

Pour cette opération, dans les travaux en grande série (exemple : machines à écrire) on peut réaliser une machine spéciale à « piéter ». Les différents éléments qui constituent le cadre de la machine sont mis en position relative dans un berceau et maintenus en contact au moyen de presseurs pneumatiques ; les vis d'assemblage sont posées aussitôt (tournevis, pneumatique). Plusieurs têtes de perçage s'approchent alors de l'ensemble et, simultanément, forent les trous dans bâti et pièces rapportées. Les têtes s'effacent, on présente les goupilles de repérage, et, après évolution de l'ensemble en montage, est présenté devant des poussoirs qui les enfoncent.

TRAVAUX DE DÉMONTAGE

On démonte un appareil :

— après essai pour en faciliter l'expédition s'il est de grandes dimensions,

— à l'occasion de réparations.

Principes fondamentaux.

● Avant d'entreprendre le démontage d'un organe de machine, il faut consulter les plans d'ensemble de cette machine ou s'efforcer, par le raisonnement, de reconstituer la disposition des pièces assemblées. On dresse alors le plan de démontage.

Quand on achète une machine on devrait toujours exiger (sur le bon de commande) la livraison des plans d'ensemble et des notices utiles tant à l'entretien qu'aux réparations futures.

Le démontage est une opération de précision qui doit être exécutée avec beaucoup de soin. Les pièces démontées seront placées dans des caisses compartimentées ; on les repérera. Celles qui sont délicates seront mises dans des chiffons *propres* graissés.

Certaines pièces ont subi, en fonctionnement, des déformations permanentes ou des usures orientées ; il faut éviter de les remonter dans une autre position : les roulements, les joints L, sont systématiquement remplacés lors du remontage.

Les pièces seront repérées par de petits coups de pointeaux ou, mieux, gravées au crayon électrique.

- On facilite le démontage des organes oxydés en les « dégrippant » avec un mélange de pétrole et d'huile ou avec certains produits commerciaux préparés à cet effet. Cette opération est toujours assez longue car le pétrole ne pénètre que lentement entre les surfaces en contact.

- On ne doit jamais frapper directement sur les pièces à démonter ; on doit employer

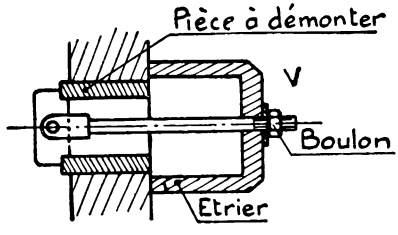


Fig. 17. — Démontage d'une bague.

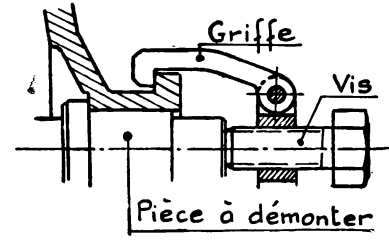


Fig. 18. — Démontage d'un arbre.

des outils à action progressive : à vis, hydraulique, arrache-moyeux, tire-roulements (*fig.* 18 et 19).

Tout choc sur un arbre, transmis à ses roulements, risque d'en marquer les couronnes et d'en compromettre le fonctionnement, la précision et la durée.

C'est au moment du démontage que l'on apprécie le graissage des vis, boulons, bagues... effectué lors du premier montage.

- On doit au cours du démontage faire de nombreuses observations qui donneront une opinion définitive sur la qualité de l'appareil ; on peut, dans certains cas, faire certaines modifications qui amélioreront considérablement son fonctionnement. On informera le constructeur des observations faites.

- Dans tout appareil il est toujours prévu un certain nombre de réglages effectués au montage et ne résultant pas que du simple empilage des pièces : ressorts plus ou moins chargés, roulements à rouleaux coniques, billes de verrouillage... Il faut, au cours du démontage, évaluer les jeux axiaux et radiaux, mesurer les couples déterminant la rotation des broches, repérer les positions relatives des pièces, etc.

Démontage des roulements.

Le démontage des roulements exige des précautions toutes particulières. Les billes et les rouleaux ne doivent jamais transmettre des efforts de démontage sauf si l'on est assuré qu'ils ne dépasseront pas les charges axiales que les roulements supportent en fonctionnement normal. Toutefois, si l'on fait le démontage en vue de remplacer le roulement, il est bien évident que cette restriction ne jouera pas (remplacement de roulements sur une automobile). Le monteur doit bien connaître les conditions d'utilisation des roulements et il faut lui remettre les catalogues et les notices nécessaires.

Installation électrique.

Avant de procéder à la dépose de l'installation il faut d'abord établir le plan de câblage si on n'en possède pas ou vérifier sérieusement si l'exécution est conforme au plan de câblage fourni par le constructeur. On repérera les fils et les bornes correspondantes avec des fils de couleur ou des étiquettes.

ORGANISATION DE LA RÉPARATION

Dans les usines bien organisées la réparation est confiée à un service autonome (ayant sa comptabilité propre) : le Service d'entretien. Pour qu'il fonctionne correctement, il faut lui adjoindre une section d'Inspection préventive des machines. Les inspecteurs sont chargés des vérifications périodiques de toutes sortes ayant trait à la sécurité, à la précision et au graissage. En cas de doute ils feront appel à la technique dite du « double démontage » qui consiste à faire démonter des sous-ensembles pour les examiner complètement. On décèlera ainsi les traces d'usure et on décidera du remplacement de certains organes ; si ces organes ne sont pas au magasin des pièces de rechange on remontera la machine immédiatement sans faire la réparation. On relèvera les repères des pièces à commander à l'extérieur ou l'on prendra le croquis de celles à construire à l'usine même. Dès que toutes les pièces de rechange sont en magasin on démonte à nouveau la machine ou le sous-ensemble incriminé et on fait la remise en état. Cette façon de procéder évite les longs arrêts de machines, pouvant paralyser toute la fabrication.

Un soin tout particulier est apporté aux organes de graissage ; on fait toute modification qui s'avère nécessaire. Le Service d'entretien fait établir, pour chaque machine qui entre à l'usine, une fiche dite « Bilan de graissage ». Cette fiche précise, sur un schéma, tous les points de graissage, la fréquence des additions d'huile ou de graisse, la nature de ces produits, les quantités à fournir et les dates auxquelles les vidanges et nettoyages doivent être entrepris.

TABLE DES MATIÈRES

● **ÉTUDE DES PROCÉDÉS DE TRAVAIL** 3

Les grands principes de l'usinage des surfaces..... 4
Le choix du type d'outil et du type de machine 4
Les outils 4
Les machines 6
Organisation des différentes phases de l'usinage 7
Recherche de la précision dans l'exécution d'une surface..... 8
Positions relatives des différentes surfaces usinées 17
Rapidité d'exécution 24

RÉALISATION DES SURFACES PLANES 30

Principes 30
Choix du procédé de travail 36
Les différents procédés d'usinage du plan 40
Le rabotage 40
Principe de l'usinage 40
Pratique du rabotage 47
Exécution de surfaces planes associées 49
Le mortaisage..... 54
Le fraisage 55
Fraisage de profil 56
Fraisage de face 64
Conditions de coupe des fraises..... 69
Les machines 75
Exécution des surfaces associées..... 79
Le brochage..... 84
Les machines à brocher 92
Travaux de rainurage 94
Rainurages extérieurs 94

● **EXÉCUTION DES SURFACES DE RÉVOLUTION, SURFACES INTÉRIEURES CYLINDRIQUES** 103

Le perçage 104
Etude de l'outil de perçage 105
Principe de travail 120
Machines utilisées pour le perçage..... 127
L'alésage 137
Principes généraux de l'alésage 138
Etude des opérations et des outils d'alésage 140
Exécution des alésages 150
Montage des barres d'alésage..... 155
Les machines à aléser 157
Gamme des opérations d'alésage : montage des outils sur les barres 162
Le perçage et alésage de précision.
Les machines à pointer 164

● **EXÉCUTION DES SURFACES DE RÉVOLUTION EXTÉRIEURES ET INTÉRIEURES** 172

Le tournage 172
L'outil de tournage 174
Position de l'outil et choix de la section du copeau 183
Support et entraînement des pièces 188
Etude critique des plateaux à serrage concentrique simultané..... 199
Serrage en pinces élastiques et en mandrin expansible 201

Evolution du tour parallèle 202
Amélioration apportée au tour parallèle 207
Le tour à tourelle revolver 210
Tours semi-automatiques à outils multilpes 215
Tours automatiques 217
Tournage par reproduction 221
Choix du tour le mieux adapté à un travail donné 229
Tours verticaux 231
Tours verticaux spéciaux 234
Travaux réalisés 235

● **USINAGE PAR ABRASION** 236
Rectification 237
Rectification de surfaces cylindriques extérieures 237
Rectification de plans 251
Conditions de travail en rectification 255
Méthode générale de travail 263
Exécution d'états de surface de haute qualité 265
Rectification fine 265
Rodage 266
Superfinition 270
● **COMMANDE NUMÉRIQUE** 273
Notions sur l'ordinateur 273
Les micro-processeurs 284
Machine à commande numérique 286
● **LE TAILLAGE** 318
Etude de principe du taillage des engrenages 318
Les engrenages 321
Les méthodes de taillage des engrenages 324
Réalisation du taillage des roues cylindriques à denture droite ou hélicoïdale 329
Taillage par outil de forme 329
Taillage par engrènement 332
Réalisation du taillage des vis sans fin 345
Taillage des roues tangentes 346
Réalisation du taillage des engrenages coniques 349
Taillage des dentures droites 349
Taillage des dentures courbes 356
Finition des engrenages 359
Rectification 359
Rodage - Rasage 361

● **FILETAGE ET TARAUDAGE** 365
Travaux de filetage 365
Machines taillant le filet à l'outil 365
Machines où l'outil est une meule 369
Filetage par déformation du métal de la pièce 372
Comparaison économique des différents procédés 375
Taraudage 377

● **TRAVAUX D'ASSEMBLAGE** 381
Organisation des travaux de montage 381
Exécution du montage 385
Montage d'appareils ou de machines en grande série 389
Manutention des organes en montage 390
Outillage de l'atelier de montage 394
Technique du montage 395
Travaux de démontage 396
Organisation de la réparation 398

LES ÉDITIONS FOUCHER
128, rue de Rivoli — 75001 Paris
N° 4875-183

IMPRIMÉ EN FRANCE

Imprimerie HÉRISSEY
ÉVREUX - 27000
31262
Dépôt légal : 1er trimestre 1977

ISBN 2-216-00200-3
B

FF 58,25